

TESIS DE MAESTRIA EN INVESTIGACIÓN OPERATIVA Y ESTADÍSTICA

TITULO:

ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE DOS MODELOS DE CONTROL DE OPERACIÓN EN LA RUTA TRONCAL TRES DEL SISTEMA INTEGRADO DE TRANSPORTE MEGABUS, EN LA CIUDAD DE PEREIRA- COLOMBIA, POR MEDIO DE SIMULACIÓN BASADA EN AGENTES.

DIRECTOR:

JOSE SOTO MEJÍA

PRESENTADO POR:

DIEGO ARMANDO GALINDRES GUANCHA

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA

MAESTRÍA EN INVESTIGACIÓN OPERATIVA Y ESTADÍSTICA

PEREIRA, 2018

AGRADECIMIENTOS

A mis padres y familia por ser mi motivación y fuerza para seguir adelante, a mi tutor por su orientación y buenos consejos, a mis compañeros por hacer que esta experiencia de aprendizaje fuese agradable y enriquecedora, y finalmente al grupo de investigación Análisis Envolvente de Datos (DEA) de la facultad de Ingeniería Industrial de la Universidad Tecnológica de Pereira por permitir y fomentar la investigación como motor de desarrollo de nuestra sociedad.

CONTENIDO

1.	RESUMEN	6
2.	INTRODUCCIÓN	7
3.	JUSTIFICACIÓN.....	9
4.	MARCO REFERENCIAL.....	10
4.1	GENERALIDADES DE LA PLANIFICACIÓN DE UN SITP	11
5.	OBJETIVO GENERAL.....	22
5.1	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	22
6.	MATERIALES Y METODOLOGIA	22
6.1	DESCRIPCIÓN SISTEMA DE TRANSPORTE.....	23
7.	MODELOS MATEMÁTICOS DE CONTROL	24
7.1	MODELO MATEMÁTICO CONTROL POR HOLDING (CH)	25
7.1.1	NOTACIÓN	26
7.2	MODELO MATEMÁTICO DE CONTROL POR VELOCIDAD (CV).....	32
7.2.1	NOTACIÓN	32
7.3	SIMULACIÓN Y DISEÑO EXPERIMENTAL	36
7.3.1	DESCRIPCIÓN DE LA SIMULACIÓN.....	36
7.4	ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN	40
7.4.1	REGULARIDAD DEL HEADWAY	40
7.4.2	DISTRIBUCIÓN DE LA CARGA DE PASAJEROS	42
7.4.3	TIEMPO PROMEDIO DE CICLO O RECORRIDO	44
7.4.4	TIEMPO DE APELTONAMIENTO TOTAL	46
7.4.5	TIEMPO DE ESPERA TOTAL.....	47
8.	CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO	54
9.	BIBLIOGRAFÍA.....	56

GRAFICAS

Figura 1. Descripción de la Metodología.	23
Figura 1. Representación de la ruta modelada.	24
Figura 2. Mapa de la ruta 3 del sistema Megabús de Pereira - Colombia. Elaboración MEGABUS S.A.	37
Figura 3a. Regularidad del Headway, Sin Control SC, Demanda Media.	41
Figura 3b. Regularidad del Headway, Sin Control SC, Demanda Alta	41
Figura 4a. Regularidad del Headway, Control Holding CH, Demanda Media.	41
Figura 4b. Regularidad del Headway, Control Holding CH, Demanda Alta	41
Figura 5a. Regularidad del Headway, Control Velocidad CV, Demanda Media.	42
Figura 5b. Regularidad del Headway, Control Velocidad CV, Demanda Alta	42
Figura 6a. Distribución de la carga de pasajeros, Sin Control SC, Demanda Media.	43
Figura 6b. Distribución de la carga de pasajeros, Sin Control SC, Demanda Alta	43
Figura 7a. Distribución de la carga de pasajeros, Control Holding CH, Demanda Media.	44
Figura 7b. Distribución de la carga de pasajeros, Control Holding CH, Demanda Alta	44
Figura 8a. Distribución de la carga de pasajeros, Control Velocidad CV, Demanda Media.	44
Figura 8b. Distribución de la carga de pasajeros, Control Velocidad CV, Demanda Alta	44
Figura 9. Variación del Tiempo de Recorrido promedio por escenario.	46
Figura 10. Variación del Tiempo de Apelotonamiento acumulado por escenario.	47
Figura 11a. Variación del Tiempo de Espera Total, para el escenario de demanda Media.	48
Figura 11b. Variación del Tiempo de Espera Total, para el escenario de demanda Alta	48
Figura 12a. Variación de la Mediana para el Tiempo de Recorrido.	49
Figura 12b. Desviación Estándar para el Tiempo de Recorrido	49
Figura 13a. Variación de la Mediana para el Tiempo de Apelotonamiento	50
Figura 13b. Desviación Estándar para el Tiempo de Apelotonamiento	50
Figura 14a. Variación de la Mediana para el Tiempo de Espera.	51
Figura 14b. Desviación Estándar el Tiempo de Espera	51
Figura 15. Interacción entre los factores Control y Nivel de demanda.	53

TABLAS

Tabla 1. Especificaciones físicas de la ruta troncal 3 de Megabus.....	38
Tabla 2. Parametrización del experimento de simulación.....	40
Tabla 3. Calculo de estadísticos para los escenarios simulados.	49
Tabla 4. Resultados de las pruebas de hipótesis del ANAVA del modelo.....	53

1. RESUMEN

El Transporte Público de una ciudad requiere movilizar un gran número de personas diariamente. Por tal razón los sistemas de transporte son componentes básicos en la estructura social, económica y física del área urbana. De ahí que la necesidad de volver estos sistemas más eficientes se ha convertido en uno de los desafíos actuales dentro de la investigación. El presente trabajo se muestra una investigación aplicada donde se aborda el problema de apelotonamiento de buses (*Bus Bunching*), donde se comparan dos modelos de control de la operación dentro de una Simulación Basada en Agentes. En el primero se aplica una estrategia de retención de los buses en las estaciones (holding) con el fin de mantener intervalos regulares entre los buses, de acuerdo a un cálculo estimado de la separación entre buses consecutivos. En el segundo modelo de control se aplica acciones correctivas variando la velocidad de los buses, dependiendo si están atrasados o adelantados en la ejecución de su recorrido teniendo como referencia una tabla horaria previamente establecida. Los resultados de los modelos son analizados de acuerdo a los siguientes indicadores: tiempo de apelotonamiento total, tiempo de espera total de los pasajeros, capacidad disponible de los buses al llegar a una estación y tiempo de ciclo o recorrido. La simulación representa una ruta real del sistema Megabús en la ciudad de Pereira – Colombia

2. INTRODUCCIÓN

Los sistemas integrales de transporte público (SITP) requieren movilizar un gran número de personas diariamente. Por tal razón, son componentes básicos en la estructura social, económica y física de un área urbana. A medida que las ciudades se concentran en zonas más grandes debido al crecimiento demográfico, el transporte y la movilidad han incrementado su importancia e impacto en la economía urbana. Es por eso que la necesidad de volver estos sistemas más eficientes se ha convertido en uno de los desafíos actuales dentro de la investigación.

El *Bus Rapid Transit* (BRT) es uno de los sistemas que más ha tomado fuerza en las últimas tres décadas, como una alternativa de transporte público masivo. Este tipo de sistema es más económico de implementar, debido a que la infraestructura y los vehículos que requiere son de menor costo comparado con otros sistemas como el Metro o el Tranvía. El BRT es un sistema de transporte motorizado con un carril exclusivo para el tránsito de buses, lo que agiliza su circulación debido a que está menos expuesto a problemas de movilidad producidos por los trancones dentro de la zona urbana, en especial en las horas pico. Se ha demostrado su atractivo, al ser implementado en ciudades como Bogotá, Colombia, (Transmilenio), Santiago, Chile (Transantiago), Los Ángeles, Estado Unidos (*Metro Rapid*), entre muchos otros. (Leiva, Muñoz, Giesen, & Larrain, 2010), (Cervero, 2013). La finalidad y objetivo de los BRT se enfoca en disminuir los tiempos de viaje y de espera para los usuarios, sin que el costo de la operación se incremente demasiado, logrando un equilibrio económico para quien presta el servicio. Es decir, que un sistema BRT se implementa en una ciudad buscando asegurar un sistema operacional y económicamente eficiente, e integrado al entorno.

Para alcanzar estos objetivos, la operación del sistema de transporte BRT debe procurar encontrar un equilibrio entre los niveles de servicio ofrecidos directamente relacionados con la frecuencia de despacho de cada una de las rutas y la fluctuación de la demanda en un día, siendo este el primer problema a resolver. Para lo anterior se deben encontrar frecuencias de despacho apropiadas (Li, Ye, & Wang, 2016), (Huang, Ren, & Liu, 2013), (Luhua, Yin, & Xinkai, 2011) de tal forma que los usuarios esperen el menor tiempo posible dentro del sistema, sin incurrir en gastos desmedidos en la operación. Claramente los objetivos contrapuestos de ambos propósitos complican la toma de decisión para la definición de las frecuencias de despacho.

Otro problema a tener en cuenta, pero ya dentro del tiempo real de la operación, es procurar que haya una sincronización de la flota de buses, de tal forma que los mismos no se estorben entre ellos, evitando así su apelotonamiento (Hernández, Muñoz, Giesen, & Delgado, 2015), (Carlos F. Daganzo, 2009). Este fenómeno es debido a la aleatoriedad de los tiempos de parada para subir y bajar pasajeros lo que hace que los buses tiendan a apelotonarse mientras transitan por sus recorridos, haciendo que se incrementen los tiempos de espera de los pasajeros, tiempos de viaje, así como también costos de la operación y que además haya más variación en la capacidad disponible de los buses, puesto que, si dos buses de una misma ruta llegan a las estaciones casi juntos, la cantidad de demanda acumulada para el segundo bus tiende a ser menor. Por lo que este fenómeno es progresivo, y si no se aplican acciones correctivas, la acumulación de buses será cada vez mayor y el sistema tiende a colapsar. (Bellei & Gkoumas, 2010). En esta investigación, se pretende encontrar una estrategia que le permita a la operación definir cuál es la forma más apropiada de controlar la circulación de los buses en tiempo real, de acuerdo a diferentes escenarios según el nivel de demanda.

En la literatura se pueden encontrar diferentes modelos de control que evitan el apelotonamiento, estos varían dependiendo de la finalidad de la estrategia de control, por ejemplo, minimizar la variabilidad del tiempo de llegada del bus a una estación y el tiempo programado en la tabla horaria, procurar intervalos constantes entre cada par de buses, con el fin de homogenizar la cantidad de personas que mantienen en espera en las estaciones o la cantidad de personas que van dentro del bus. Por lo tanto, el objetivo que tenga la estrategia de control y el sistema en que se lo esté aplicando, harán que un modelo de control puede ser más apropiado que otro.

En el presente trabajo se comparan dos modelos de control de la operación dentro de una Simulación Basada en Agentes. En el primero se aplica una estrategia de retención de los buses en las estaciones (holding) con el fin de mantener intervalos regulares entre los buses, de acuerdo a un cálculo estimado de la separación entre buses consecutivos. En el segundo modelo de control se aplica acciones correctivas variando la velocidad de los buses, dependiendo si los buses están atrasados o adelantados en la ejecución de su recorrido teniendo como referencia una tabla horaria previamente establecida

Se implementó una simulación con los dos modelos de control, con el fin de evidenciar el impacto en ciertos indicadores de calidad del servicio como tiempo de ciclo, tiempo de espera, tiempo de apelotonamiento y capacidad disponible de los buses al llegar a una estación. La simulación implementada, permitirá responder el siguiente cuestionamiento: ¿Es posible determinar qué estrategia de control en tiempo real puede ser más apropiado de acuerdo al nivel de demanda?

3. JUSTIFICACIÓN

Para los SITP de las ciudades es de suma importancia garantizar un buen nivel de servicio con el objetivo de que la demanda de pasajeros no disminuya, por el contrario, compita con otras alternativas para movilizarse, moto o carro particular. El nivel de servicio está asociado a distintos aspectos que son percibidos por el pasajero, tales como: Tiempos de espera y viaje, comodidad, costo, confiabilidad, regularidad, seguridad, etc.

La ausencia de un sistema de control en una red de transito de buses desencadena el fenómeno conocido como apelotonamiento de vehículos debido a la naturaleza estocástica natural del flujo de tráfico y demanda de pasajeros en las estaciones. También conduce a un aumento evidente en la variación del avance de los buses y por ende el incremento de la magnitud de los tiempos de espera lo que a la vez produce que la percepción de comodidad y confiabilidad de los pasajeros del servicio disminuya.

A pesar de la cantidad de investigaciones enfocadas en diseñar una estrategia de control para la operación de un sistema de transporte, no existen muchas investigaciones que comparen el desempeño de dos estrategias dentro de un mismo contexto (Juan Carlos Muñoz et al., 2013). En el presente trabajo se presenta una Simulación Basada en Agentes, para evidenciar el impacto que genera en la operación, el tipo de modelo de control que se aplique sobre la ruta troncal 3 del Sistema Megabus en la ciudad de la Pereira (Colombia)

Se compara dos modelos de control, creados en el grupo de Investigación Análisis Envolvente de Datos (DEA) de la Universidad Tecnológica de Pereira, tomando como referencia los encontrados en la literatura y permitiendo que se puedan aplicar en el contexto local del sistema MEGABUS. Se ha observado que en ninguna otra investigación se compara un modelo de *Holding* que tenga como

objetivo mantener *Headways* regulares, con puntos de control dinámicos y otro de variación de velocidad que busca ajustar la operación a una tabla horaria establecida previamente. Ambos modelos utilizan información de entrada para estimar las desviaciones de los avances de los buses y además ambos modelos fueron linealizados para ser resueltos de forma exacta, es decir, que las acciones de control resultantes se hallan al resolver un problema de programación lineal (PPL). La simulación se implementó en el Software *AnyLogic* TM, bajo el paradigma de Simulación Basada en Agentes y permitirá representar la operación de una ruta del sistema Megabus con bastante precisión sobre un mapa Georreferenciado (*Open Street Map*).

4. MARCO REFERENCIAL

Los Sistemas Integrados de Transporte Público (SITP) actualmente, juegan un rol imprescindible en la movilidad de las personas en la zonas urbanas.(Vidales & Daniel, 2005). El término transporte público se refiere al transporte de tipo comercial de personas, es decir, un servicio de transporte urbano de pasajeros al que se accede mediante el pago de una tarifa fijada y que se lleva a cabo con servicios de despacho regulares, dentro de recorridos o rutas establecidos, horarios y puntos de acceso determinados (González, 2003). En general en los SITP intervienen los siguientes actores:

Usuarios: los cuales tienen como objetivo viajar desde un origen hacia un destino de la forma más rápida, confortable, segura y con el menor costo monetario posible. Para estos actores, el tiempo de viaje o tiempo de espera es el principal objetivo a minimizar (el confort también puede cuantificarse mediante el nivel de ocupación de los buses). El tiempo de viaje tiene una componente de espera en la parada y otra de viaje dentro del vehículo. Lo más apropiado para los usuarios es viajar por el camino o ruta que minimice la distancia recorrida y por ende el tiempo de viaje, por tanto, para los usuarios la frecuencia de despacho en cada ruta debería ser la máxima posible, sin embargo, este escenario no es el más apropiado desde el punto de vista de los operadores (ya que no se garantiza una utilización redituable de los buses) y además el costo de la operación se incrementaría porque habría más buses en circulación.

Operadores: El principal objetivo de los operadores es la rentabilidad de los servicios que tienen dentro de su operación. Esta queda definida por la recaudación proveniente de cada uno de los

pasajeros que se transporta, menos los costos operacionales, por lo que el objetivo de los operadores sería transportar la mayor cantidad de pasajeros con el menor costo operativo posible. El mejor escenario para los operadores es tener una frecuencia de despacho baja con el fin de asegurar que los buses transporten la mayor cantidad posible de pasajeros teniendo como limite la capacidad de los buses. Sin embargo, este escenario no es el más conveniente para los pasajeros, dado que no asegura tiempos de espera razonables y poca comodidad al viajar debido a la saturación de demanda dentro del sistema.

Autoridades: El papel de las autoridades de transporte es regular los SITP; su principal interés es asegurar un servicio ágil y cómodo a un costo razonable, delegando la operación de los servicios a las empresas de transporte. Tareas como la determinación de frecuencias mínimas, tarifas y satisfacción de demanda, típicamente son llevadas a cabo por las autoridades. Por tanto, las autoridades deben pretender un equilibrio entre los objetivos de los usuarios y los de los operadores, de tal forma que sea atractivo para ambas partes con objetivos claramente contrapuestos. (Mauttone & Antonio, 2005)

Desafortunadamente, el crecimiento de la población es un fenómeno que se relaciona directamente con la saturación de los SITP, y que seguirá aumentando en los próximos años, por lo que el problema de hacinamiento, no disminuirá en el corto plazo y a pesar de las grandes inversiones que se necesitan para su implementación y operación, la falta de planificación, hace que este tipo de sistemas se vuelva costoso en términos de funcionalidad y baja calidad en la prestación del servicio, sí se habla del tiempos de espera, de viaje y del confort para sus usuarios. A continuación, se mencionan los aspectos y fases más relevantes en el proceso de planificación de los SITP.

4.1 GENERALIDADES DE LA PLANIFICACIÓN DE UN SITP

La planificación de un SITP se compone de tres grandes etapas (Ceder, 2016):

Selección de tecnologías: Se refiere al tipo de transporte que se va implementar en la ciudad. Las tecnologías más comunes son: bus, bus articulado, metro y tranvía. La decisión de cuál escoger, está determinada por la velocidad de operación, capacidad, impacto ambiental, restricciones geográficas y económicas.

Estimación de la demanda: Implica conocer las necesidades de transporte de pasajeros entre distintos puntos de la ciudad. En esta etapa se estima principalmente la cantidad potencial de pasajeros que se transportarían diariamente, además de las zonas donde se genera la mayor cantidad de viajes y las zonas que atraen mayor cantidad de pasajeros en diferentes ventanas de tiempo durante el día, puesto que la demanda cambia de comportamiento, en cantidad y en necesidad de viajes, dado que los pasajeros que viajan en hora pico no tienen las mismas características que los que viajan en una hora valle.

Selección del mejor sistema: Esta decisión se ve afectada por la planificación operacional del sistema, e incluye etapas como la definición de los trazados de los recorridos, determinación de la política de despacho de los servicios y ubicación de estaciones, trasbordos e intercambiadores.

En (Cipriani, Gori, & Petrelli, 2012) el proceso de decisiones involucrado en la selección del mejor sistema, se considera dividido en cinco etapas:

1. **Determinación de recorridos.** Implica definir la estructura topológica de cada recorrido o ruta, como una secuencia de calles.
2. **Determinación de las frecuencias de despacho.** Implica definir el intervalo de tiempo entre salidas de los buses en los recorridos definidos anteriormente.
3. **Determinación de las tablas de horarios.** Implica establecer detalladamente los horarios de salida y llegada de los buses a las estaciones cuando hace un recorrido.
4. **Asignación de buses a recorridos.** Implica asignar la flota de buses disponibles a la realización de los diferentes servicios.
5. **Asignación de conductores.** Implica la asignación del personal a la operación de los diferentes servicios.

Estos autores, sin embargo, no mencionan la etapa de control en el momento de la operación. Esta es otra etapa que se podría considerar dentro de la planificación, debido a que, dependiendo de la estructura topológica y la determinación de frecuencias y tablas horarias, los modelos de control de la operación en tiempo real pueden ser apropiados unos más que otros. Esta etapa no se puede desconocer dentro de la planeación debido a que es necesaria dado la naturaleza estocástica de la demanda, por lo que los tiempos de recorrido dentro de la operación hacen que el avance planeado de los vehículos se vea afectado haciendo que las tablas horarias no se puedan cumplir, además del surgimiento de acumulación de buses (apelotonamientos).

En (Desaulniers & Hickman, 2007), las etapas de planificación son clasificadas según su alcance como:

Planificación estratégica. Involucra decisiones a largo plazo, etapa 1. (Diseño de recorridos)

Planificación táctica. Implica la toma de decisiones en periodos de tiempo de duración media, etapas 2 y 3. (Definición de frecuencias de despacho y tablas horarias)

Planificación operacional. Involucra decisiones que se toman una vez por mes por día, o continuamente en tiempo real, etapas 4 y 5. (Asignación de buses a recorridos, asignación de conductores y control de la operación)

Las etapas 1 y 2 son típicamente ejecutadas por las autoridades. Las etapas 3, 4 y 5 son ejecutadas típicamente por los operadores. Por lo tanto, la gestión de los recursos (buses, personal de operación) que determinan los costos operacionales de los servicios de transporte público, es tarea de las empresas de transporte. Sin embargo, las decisiones tomadas a este nivel (etapas 3, 4 y 5) están condicionadas por las decisiones tomadas en las etapas iniciales (etapas 1 y 2).

No obstante, la falta de un ejercicio detallado de planificación, ha hecho que este tipo sistemas sean estigmatizados como un mecanismo no muy atractivo para desplazarse diariamente. Además de las altas tarifas cobradas al usuario, se han venido desencadenando fenómenos emergentes como el aumento considerable del parque automotor (vehículos privados y motocicletas), lo que para una ciudad y en este caso en particular Pereira (Risaralda), significa una intensificación de los problemas de transporte y para los SITP, una gran cantidad de usuarios que no volverán a utilizar el servicio

(González, 2003), llevando al modelo de transporte masivo a tener problemas de sostenibilidad financiera.

La dificultad de la planeación en cualquier etapa se debe a que no existen herramientas matemáticas computacionales estándares adecuadas para el apoyo en la toma de decisiones debido principalmente a:

- Dificultad del modelado de las características de los sistemas
- Complejidad de la información que deben manipular y disponer.
- Dificultad de adaptación a las condiciones particulares de cada caso.

Por tanto, los modelos de control en tiempo real se los puede clasificar como estrategias de planificación y de operación, puesto que la planificación sirve para establecer qué tipo de modelo de control es más conveniente comparándolo con otro dentro del SITP en referencia, y en la operación ayuda generalmente a mantener un recorrido constante de los vehículos disminuyendo el apilotonamiento o a cumplir las tablas horarias establecidas previamente.

Otros autores, también clasifican la definición de frecuencias y establecimiento de tablas horarias (etapas 2 y 3 anteriormente mencionadas) como estrategias de control a largo plazo, y las estrategias de control en tiempo real como estrategias de corto plazo. (Saeed Zolfaghari, Azizi, & Jaber, 2004)

La aplicación de estrategias de control para la operación (llamadas así porque son las que implementan decisiones a nivel operacional) varían según el tipo de SITP, ya que dependiendo de su topología puede cambiar su finalidad y objetivo. El Bus Rapid Transit (BRT) es una alternativa de transporte público masivo, cuya finalidad se resume básicamente en disminuir los tiempos de viaje y de espera para los usuarios (Cervero, 2013), siempre que se pueda lograr un sistema en *armonía*: operacional y económicamente eficiente e integrado adecuadamente a su entorno. (Rohani, Wijeyesekera, & Karim, 2013).

Para garantizar la armonía entre la operación y la demanda de un SITP no solo se hace referencia a niveles de servicio acordes con el nivel de demanda (definición de frecuencias de despacho), sino

que además, se debe procurar una sincronización de la flota de buses durante la operación, de tal forma que los mismos no se estorben entre ellos, impidiendo su normal circulación, lo que produce un incremento en los tiempos de viaje, espera, y también el costo de la operación. Según (Lo & Chang, 2012) los sistemas BRT requieren de supervisión constante para disminuir el efecto de la demanda variable, cambios en la velocidad de los vehículos, señalización de tránsito, perturbaciones por el clima, y fallas mecánicas o accidentes.

Por tanto, la planificación de la operación no es suficiente para garantizar una armonía del sistema con el entorno, dado que factores cotidianos afectan continuamente la normalidad del tránsito de la operación. Estas anomalías, sumado al tiempo variable de parada de un bus en cada una de las estaciones, hacen que emerja un fenómeno denominado apilamiento de buses conocido en la literatura como "*Bus Bunching*". A este fenómeno se lo conoce como una tendencia natural, que tienen los autobuses a agruparse. Entre las causas más generales se ha establecido que cuando un bus está viajando a través de su ruta, tiene que recoger y dejar un número relativamente mayor de pasajeros, lo que retrasa su avance aún más. A medida que el bus rezagado se llena, los siguientes buses tendrán menos pasajeros acumulados para servir, y por tanto disminuirá también el tiempo en que lo hacen (tiempo de parada en una estación). Finalmente, el bus que va a la cabeza del recorrido puede ser alcanzado por uno o varios buses siguientes y siguen viajando como un pelotón.

El agrupamiento de los autobuses es el producto de dinámicas inestables que causan retrasos durante los recorridos (Desaulniers & Hickman, 2007). Incluso una pequeña perturbación, como una señal de tránsito o un obstáculo en el carril, puede desestabilizar la ruta y conducir al agrupamiento de los autobuses (Milkovits, 2008). La naturaleza progresiva de este fenómeno implica que si no se aplican acciones correctivas, la acumulación será cada vez mayor en las siguientes estaciones, afectando además la distribución de carga de los buses, el tiempo de espera de los usuarios y el costo de la operación, factores que a su vez disminuyen la comodidad del viaje, y la confiabilidad del sistema.

Este trabajo se enfoca en la aplicación de estrategias de control en tiempo real en un SITP, las cuales se pueden clasificar en los siguientes grupos de acuerdo con (F. Delgado, Muñoz, Giesen, & Cipriano, 2009), quienes identifican tres enfoques de cómo se ha abordado el problema de control óptimo en tiempo real: control en estaciones, control entre estaciones y otros controles.

En el primer grupo de control en estaciones, se tiene estrategias como la retención de vehículos o Holding, que básicamente consisten demorar más del tiempo previsto para subir y bajar a todos los pasajeros en una estación, con el fin que el bus antecesor amplíe su distancia respecto del bus retenido (F. Delgado, Munoz, & Giesen, 2012), (Qin Chen, Adida, & Lin, 2013) (He, 2015).

En el mismo grupo de estrategias, también se encuentran las estrategias que consisten en acortar el tiempo de parada en las siguientes estaciones al impedir que todos los usuarios aborden el bus *boarding limits* (Felipe Delgado, Munoz, & Giesen, 2012), (Felipe Delgado, 2009) y así corregir demoras de en el recorrido.

También hacen parte del control en estaciones, otro grupo de estrategias que consisten en determinar si se hacen salto de estaciones o *Station Skipping*, usada frecuentemente en corredores de alta demanda, haciendo que los buses que están atrasados en su recorrido no paren en estaciones de baja demanda y así corregir el avance de los mismos. (Liu, Skabardonis, & Zhang, 2003), (Giahi & Tavakkoli-Mogahddam, 2014), (Gabriel E. Sánchez-Martínez, Wilson, & Koutsopoulos, 2017)

Sin embargo, las estrategias *boarding limits* y *Station Skipping*, anteriormente mencionadas, son propensas a producir inconformidades en los usuarios que no pueden abordar los articulados ya que el tiempo de espera se incrementa. Además, la implementación de este tipo de modelos exige altos requerimientos tecnológicos para obtener información como la posición de los buses articulados y la cantidad de pasajeros en los buses y las estaciones, lo cual dificulta su aplicación práctica. Además, la estrategia *Station Skipping* es adecuada para un SITP donde la red de carril exclusivo permita hacer adelantos entre los mismos buses, algo que no se podría hacer en el sistema de estudio llamado MEGABUS.

En el segundo grupo, de estrategias de control entre estaciones, se tiene la modificación de velocidades (Ramírez, Soto, & Orozco, 2015), los adelantos entre vehículos y la manipulación de señales de tránsito (Liu et al., 2003), (van Oort & van Nes, 2010), (Wang & Zhu, 2012).

Y en el tercer grupo, otros tipo de control, se plantean estrategias de control que pueden alterar la frecuencia de despacho de los vehículos en respuesta a la demanda (Yu et al., 2011), y en general estrategias que ayuden a incrementar el nivel de servicio como adicionar buses a la operación, o que un bus solo recorra una parte del recorrido con mayor demanda (Cortés, Jara-Díaz, & Tirachini, 2011).

Otro grupo de investigaciones combina estrategias de dos o más grupos mencionados (Teng & Jin, 2015), (Zimmermann, Kraus, Koehler, & Camponogara, 2016). Acuerdo a lo analizado por (Shen & Wilson, 2001), se encuentra que llevando acabo las estrategias de control se puede disminuir entre un 10% a 18% el tiempo de espera de los pasajeros.

En esta investigación se implementó una estrategia de holding que pertenece a la categoría de control en estación y una estrategia de variación de velocidad que pertenece al grupo de estrategias entre estaciones. La estrategia de Holding determina un tiempo de parada en las estaciones superior al tiempo mínimo requerido para el ascenso y descenso de pasajeros, a la fecha es una de las utilizadas y estudiadas por su versatilidad a ser aplicada en cualquier tipo de SITP (Ibarra-Rojas et al., 2015). La estrategia de variación de velocidad, se implementa con el fin de que los buses cumplan una tabla horaria a lo largo de su recorrido.

En un principio, las estrategias de control fueron adaptadas a modelos ya existentes, en (S. Zolfaghari, Azizi, & Jaber, 2004) se modificó una metodología de control para sistemas de trenes, llegando a un modelo de programación matemática que utiliza información de un sistema AVL (*Automatic Vehicle Location*) para minimizar el tiempo de espera de los pasajeros en todas las paradas en esa ruta, además, el modelo desarrollado en este artículo se caracteriza por la flexibilidad de adoptar situaciones en las que la ocupación de los autobuses podría ser alta o baja.

En (C.F. Daganzo, 2009) se desarrolla una estrategia de holding en la que los vehículos son analizados en parejas. Se utiliza un modelo adaptativo dinámico que utiliza holding y variación de velocidades en los vehículos para mantener *headways* (distancia entre buses consecutivos) regulares. La experiencia demuestra que, en escenarios de frecuencias altas, los buses suelen llegar incumplir la programación, debido a la aleatoriedad de los tiempos de viaje y de parada y su impacto sobre el avance de los vehículos, dado la generación de apelotonamientos. Concluyen que generalmente los

intentos de control exitosos de una flota se deben a que el sistema no ha tenido mayores perturbaciones o que éstas han sido mitigadas constantemente antes de su propagación en todo el sistema.

El uso de pronósticos para el control por *Holding* se da en (W. Chen, Yang, Feng, & Chen, 2012), donde se propone un control preventivo donde la información de entrada son estimaciones de desviaciones en los *Headways*. En (Q. Chen, Adida, & Lin, 2013) se estiman los tiempos de parada en las estaciones mediante regresión lineal y se considera el abordaje de pasajeros durante la ejecución de los tiempos de Holding. Se usaron tiempos de viaje determinísticos y no se incluye limitaciones de capacidad en los vehículos.

Otros autores enfocan las estrategias de control a la reducción de los tiempos de espera de los pasajeros, dejando a un lado el cumplimiento de la tabla horaria o la conservación de *Headways* regulares. En (F. Delgado et al., 2012) se emplea este objetivo y se combinan las estrategias de *Holding* y *boarding Limits*, se logra una mejor distribución de pasajeros, sin embargo, el impedir que estos aborden un vehículo es una acción de difícil implementación que causa inconformidad.

El *Headway* frecuentemente se calcula como la diferencia entre el tiempo de llegada estimado de dos vehículos consecutivos a una estación dada. Un enfoque más completo se presenta en (Ji & Zhang, 2013), donde el control para *Headways* regulares se hace estimando “*time gaps*”, estos son el tiempo que le tomará a un vehículo llegar a la posición del siguiente. Se considera la influencia de la demanda en los tiempos de parada, la posición y velocidad de los vehículos en los tiempos de viaje. Otro ejemplo de control por Holding se presenta en (He, 2015) en donde se propone un modelo para determinar de forma adaptativa los tiempos de Holding y los cambios de velocidad, considerando la influencia de los procesos de abordaje y descenso de manera cuadrática. El modelo se evalúa en una simulación bajo los criterios de reducción del *Bus Bunching*, regularidad del *Headway* y velocidad de operación. También, (Teng & Jin, 2015) desarrollan un sistema para reducir el apilotonamiento utilizando tres estrategias de control, variación de velocidad, la manipulación de señales de tránsito y el *Holding*. La integración de múltiples tecnologías permite un control cooperativo con gran desempeño, sin embargo, este solo es aplicable en sistemas de transporte con la infraestructura y tecnológica necesaria, debido a los requerimientos de información en tiempo real en conjunto con la interacción armónica del sistema de señales de tránsito.

Por otra parte, las investigaciones cuyos modelos de control se enfocan en el cumplimiento de una programación previamente establecida *Schedule*, muestran que las estrategias de holding para retener los buses en las estaciones de control, no son las más adecuadas debido a que estos métodos requieren demasiada holgura y retrasan los autobuses haciendo difícil el cumplimiento de la programación. Por tanto, las estrategias de *Holding* para mantener *headways* regulares, no pueden garantizar que buses se adhieran a una programación preestablecida. (Xuan, Argote, & Daganzo, 2011). Así, para un SITP con un escenario de alta demanda, las estrategias de holding cuando se tiene por objetivo minimizar la diferencia entre el tiempo de llegada real y el tiempo estimado de llegada a una estación, no es la estrategia más conveniente, puesto que habría una tendencia a que los buses se agrupen, incumpliendo la finalidad del control.

No obstante, A pesar de la cantidad de investigaciones enfocadas en diseñar estrategias de control para la operación de un SITP, las investigaciones que comparan el desempeño de dos estrategias dentro de un mismo contexto no son numerosas (J.C. Muñoz et al., 2013). En esta investigación se comparan dos modelos de control para minimizar tiempos de espera, el primero basado en una optimización determinista a largo plazo, mientras que el segundo propone un enfoque predictivo híbrido considerando un horizonte más corto y una evolución estocástica del sistema. Los resultados muestran que el enfoque determinista funciona mejor bajo escenarios donde la capacidad del bus se puede alcanzar frecuentemente a lo largo de la ruta mientras que el enfoque de control predictivo híbrido se comporta mejor en situaciones donde esto no sucede. Sin embargo, se simuló un corredor con estaciones distribuidas de manera uniforme, ignorando el impacto de las distancias entre estaciones en la efectividad del control. Además, en sistemas de transporte que operan a alta frecuencia, la reducción del tiempo de espera no tiene un impacto significativo en la satisfacción de los pasajeros, por el contrario, sí es importante conservar *headways* regulares para evitar formación de apelotonamientos.

Según las características de cada sistema se debe seleccionar una medida de desempeño adecuada a la cual enfocar el control. Para una frecuencia de servicio alta y estaciones cercanas entre sí, la regularidad del *Headway* resulta una mejor estrategia para mitigar la aparición de apelotonamientos. No obstante, las estrategias de variación de velocidad han demostrado no afectar el avance de los vehículos como las estrategias Holding, y sí pueden estar sujetas a un horario sin mayores requerimientos de información, como se muestra en (Ramírez et al., 2015)

En (G. E. Sánchez-Martínez, Koutsopoulos, & Wilson, 2016) Se tiene en cuenta que los tiempos de recorrido y una demanda variable en el tiempo. Se genera un plan de acción basado en Holding que no tiene en cuenta solamente el estado actual del sistema, sino también la evolución del mismo durante un horizonte de tiempo. Los resultados muestran que el control basado en demanda variable supera a su equivalente estático en casos de alta demanda donde la capacidad máxima de los buses es alcanzada, y en menor medida en casos de demanda baja a moderada con tiempos de retención más equilibrados.

Una estrategia que modela los tiempos de recorrido y demanda dinámicamente puede ser capaz de prever cómo la demanda adicional que se genera en la hora pico puede causar interrupciones, haciendo predicciones más precisas de las capacidades disponibles de los buses, lo que podría ayudar a evitar la retención de vehículos llenos, puesto que estas acciones, en este caso, aumentarían los tiempos de viaje de los pasajeros a bordo sin acortar los tiempos de espera de los pasajeros en las paradas siguientes. Sin embargo, este modelo está sujeto a la disposición de la información en tiempo real, y depende mucho de la precisión y el detalle que se tenga sobre el comportamiento de la demanda en cada una de las estaciones, por lo que en un sistema que no tenga conteo de pasajeros dentro de los buses, no se podría tener el impacto deseado.

En (Zimmermann et al., 2016) se examinan dos estrategias de control por Holding basada en Headways en una microsimulación, donde la información que alimenta los modelos, se obtiene por retroalimentación y predicción. La estrategia que usa predicción muestra mejor desempeño en la reducción de tiempos de espera, pero requiere mayor cantidad de información adicional proveniente de sistemas de conteo automático de pasajeros. Sin embargo, si no se cuenta con este tipo de tecnología, no es posible hacer un control adecuado que utilice solo la información de estado disponible en el sistema. Además, se encontró que permitir una mayor variación en los recorridos entre los buses (Headway) conduce a posibles mejoras en el retraso total de la flota, en comparación con el estricto cumplimiento de un avance de los servicios, sin embargo, esto incrementa la variación en la carga de pasajeros.

En (Berrebi et al., 2017) Se hace una comparación de varios modelos Holding en una ruta con alta frecuencia de despacho. El operador retiene los buses en los puntos de control con el fin de regular la distancia entre los buses y así evitar el agrupamiento de los mismos. Se compara estrategias de

Holding utilizados en la práctica y estrategias recomendados en la literatura utilizando datos históricos y simulados de la ruta 72 de *Tri-Met* en Portland, Oregon. En cada estrategia se evalúa su desempeño de acuerdo a la variabilidad del avance y tiempo de espera promedio de los pasajeros. Se hace un análisis de sensibilidad de cada estrategia variando sus parámetros y el número de puntos de control.

Los autores concluyen que las estrategias enfocadas en dar cumplimiento a tablas horarias requieren poco tiempo de retención, pero no son capaces de estabilizar los recorridos incluso cuando se aplican controles muy seguidos. Los métodos que buscan regular la distancia entre los buses son capaces de controlar con éxito la separación de los buses, pero requieren largos tiempos de espera, lo que retrasa el tiempo de ciclo. Los métodos basados en la predicción consiguen el mejor desempeño entre la regularidad de los recorridos y el tiempo de espera. Además, las estrategias basadas en predicción serán sensibles a la precisión de la predicción.

En el presente trabajo se presenta una Simulación Basada en Agentes conocida también como microsimulación, para evidenciar el impacto en indicadores referentes a la calidad del servicio como tiempo de apaltonamiento total, tiempo de espera total, tiempo de ciclo promedio y capacidad de los buses al llegar a una estación. El impacto se evidencia de acuerdo al tipo de modelo de control que se aplique, además de un escenario sin control. Se analizan dos tipos de control: haciendo retención (*holding*) en diferentes estaciones debido a su fácil implementación operativa (Lizana, Muñoz, Giesen, & Delgado, 2014) y variando la velocidad de los buses por su factibilidad para ser aplicada en la topología local (Ramírez et al., 2015) ambos modelos son predictivos ya que estiman el tiempo que un bus va a ocupar la posición de su predecesor. La simulación se hizo con el Software *AnyLogic TM*, la cual permitió representar la operación de una ruta del sistema Megabus con bastante precisión sobre un mapa Georreferenciado (*Open Street Map*), y asimismo permitió identificar cuál es el tipo de control más conveniente para aplicar sobre la ruta troncal 3 del Sistema Megabus en la ciudad de la Pereira (Colombia). Los análisis se hacen bajo un escenario de demanda baja y alta.

5. OBJETIVO GENERAL

Implementar y analizar una Simulación-optimización Basada en Agentes en un ambiente virtual georreferenciado, donde se represente la operación de la ruta troncal tres del sistema Megabus en Pereira (Colombia), con el fin de evidenciar el desempeño de dos modelos de control de operación en tiempo real, en indicadores de servicio como tiempos de espera total, tiempo de apelsonamiento, capacidad disponible del bus, tiempo de ciclo o recorrido y poder definir cuál es el más apropiado de acuerdo al nivel de demanda.

5.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Definir el contexto de forma detallada donde se va a aplicar el estudio.
- Construir el contexto virtual de la simulación con ubicación Georreferenciada para que la representación sea lo más aproximada posible a la realidad.
- Programar los modelos de control que se van a aplicar y el motor de solución y optimización de los mismos en el Software de simulación Anylogic TM
- Analizar los resultados de las simulaciones y los escenarios definidos con el fin de evaluar las ventajas y desventajas de cada uno de los modelos de control y el impacto observado los indicadores de servicio definidos.

6. MATERIALES Y METODOLOGIA

En este capítulo se muestra y detalla la metodología desarrollada en el presente trabajo. La Figura 1 presenta el esquema general de la metodología planteada, la cual se compone de 6 etapas, las cuales se generalizan más adelante con el fin de mostrar las características de cada una.

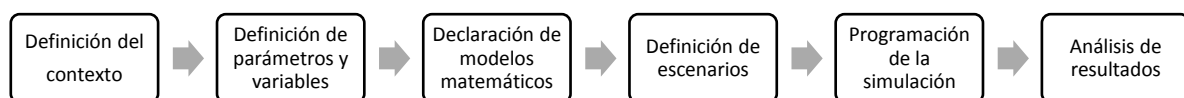


Figura 1. Descripción de la Metodología.

En la primera etapa se describe el contexto donde se va hacer estudio, en este caso una de las rutas del sistema Megabus. Luego se definen las variables y parámetros necesarios de acuerdo a la naturaleza de cada modelo de control. Posteriormente se describen los modelos matemáticos y la linealización hecha a cada uno. Los escenarios definidos para la simulación están condicionados principalmente por el nivel de demanda. Luego se dan detalles de la implementación de la simulación y el software utilizado. Finalmente, se analizan los resultados obtenidos.

6.1 DESCRIPCIÓN SISTEMA DE TRANSPORTE

La ciudad de Pereira (Risaralda – Colombia) cuenta con un sistema BRT, con carril exclusivo aislado del tráfico particular durante la mayor parte del recorrido, compuesto por rutas troncales que atienden las zonas de mayor atracción demanda (centro de la ciudad) y rutas alimentadoras que circulan por las periferias de la ciudad. Las rutas alimentadoras no cuentan con carriles exclusivos, por tanto, no están caracterizadas como sistema BRT y el tamaño de los buses es menor en comparación con las rutas troncales. En este trabajo, los esfuerzos se han concentrado en el análisis de la ruta troncal 3 del sistema conocido como Megabús. Esta ruta cuenta con un corredor de tránsito que forma un circuito cerrado, es decir que la estación inicio es también donde la ruta finaliza su recorrido. La ruta cuenta con E estaciones que no están distribuidas de forma regular y que tiene una distancia de recorrido de 14.7 Km.

El número de buses que se desplazan por el corredor de la ruta es representado por el conjunto U . Los vehículos inician su operación en la estación 1, y durante su recorrido pasan por todas las otras estaciones $(2, 3, \dots, E)$ a lo largo del corredor hasta regresar al origen (ver Figura 2). La demanda es variable y la estimación de los valores esperados de llegada en cada estación, se hace a partir de una matriz Origen-Destino. La distribución de la demanda se calcula de acuerdo al flujo de llegada de los pasajeros y la estación destino se define de acuerdo a las proporciones de la matriz Origen-Destino.

El orden de salida de los buses determinará la numeración con la cual se identificará a un bus que empieza su recorrido, es decir, son numerados según el orden de partida desde la estación 1, de

esta forma, el primer bus es aquel que va a terminar su recorrido de primero y tendrá un Id igual a 1, los buses precedentes que inicien su recorrido se caracterizan así (2, 3, ... , U).

De igual forma, las estaciones son numeradas según el orden en que son visitadas por los buses a lo largo del corredor (ver Figura 2).

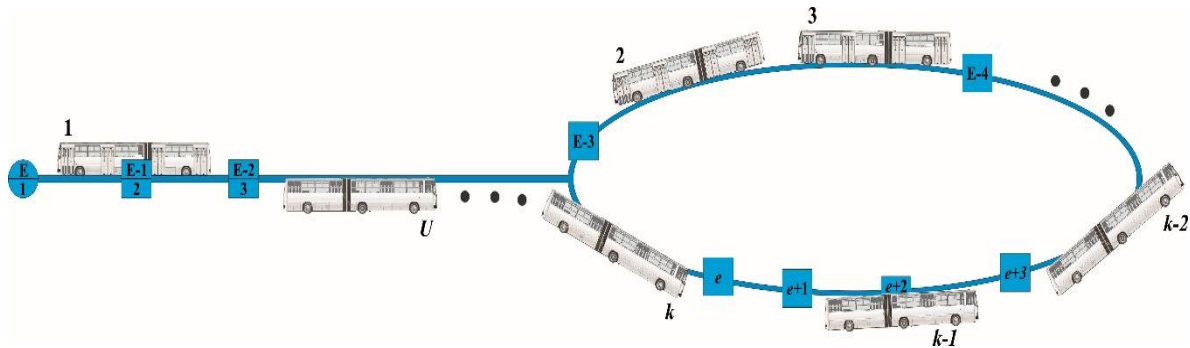


Figura 2. Representación de la ruta modelada.

A continuación, se describen las características de la operación de la ruta:

- No se permiten adelantamientos.
- Los buses se pueden ocupar hasta su capacidad máxima.
- La demanda es variable y diferente en cada estación, estimada con una matriz Origen-Destino.
- La flota es homogénea con igual capacidad de carga de pasajeros.
- La frecuencia de despacho de buses es constante.
- Se dispone de un sistema GPS para la localización de los vehículos.
- Se dispone de información de los registros de pasajeros que ingresan en cada estación y los tiempos de llegada y salida de los buses en las estaciones visitadas.
- Los tiempos de abordaje y descenso para cada pasajero se consideran constantes.

7. MODELOS MATEMÁTICOS DE CONTROL

Inicialmente se construirá el contexto virtual de la simulación, donde se programarán cada uno de los modelos de control por separado. Luego se debe programar el motor de solución de los

Problemas de Programación lineal (PL) que cada modelo de control lleva implícito. Con la solución de estos PL se obtiene la estrategia óptima para cada modelo en un tiempo dado de la simulación. Posteriormente se analiza la información y se establece cuáles son las diferencias significativas entre las dos estrategias en el contexto local.

En este capítulo se describen los modelos matemáticos que se aplicaron en la ruta troncal anteriormente descrita del sistema Megabus. Los objetivos de las estrategias de control son diferentes, ya que el primero (Control por Holding), procura mantener una regularidad en la separación de los buses (headway) y el segundo (Control por Velocidad) procura que los buses se ajusten a una programación previa, donde se definen los tiempos de salida de cada bus en cada estación que visita. Ambos modelos se ejecutan en tiempo real y por tanto los dos hacen estimaciones del avance para definir si es pertinente aplicar una acción de control.

Las acciones de control pretenden corregir de forma dinámica las desviaciones de los avances de los buses en su recorrido, estas desviaciones son relativas al objetivo de la estrategia, es decir, la estrategia de control por Holding compara el avance de un bus, con respecto al bus que lo precede, con el fin de determinar cuál de los dos se debe retener en la estación más próxima a llegar. La estrategia de control de velocidad, compara el avance de un bus y estima cuanto va a tardar en llegar a la estación más próxima con el fin de establecer si llegará antes o después del tiempo programado. Además, ambos modelos han sido linealizados, con el fin de poder establecer, en ambos casos, estrategias óptimas que mitiguen las perturbaciones al resolver Problemas de Programación Lineal con tiempos computacionales adecuados para ser aplicados en tiempo real. A continuación, se muestra el detalle de cada modelo de control mencionado.

7.1 MODELO MATEMÁTICO CONTROL POR HOLDING (CH)

El modelo de control por *Holding* tiene como objetivo conservar la regularidad de separación entre buses, se minimiza la variación entre el alejamiento de dos buses consecutivos respecto de un valor dado (tiempo entre salida de dos buses). El cálculo del *Headway* estimado durante el recorrido considera la distancia física a recorrer y los tiempos de espera estimados en las estaciones.

Se considera un tiempo de parada mínimo para el ascenso y descenso de pasajeros, más un tiempo adicional de retención (Holding), que viene siendo la variable de decisión que será un óptimo global

que corrige los atrasos o adelantos en la operación de los vehículos ocasionados por la aleatoriedad del sistema.

7.1.1 NOTACIÓN

Cuando se soluciona el modelo, se utiliza información de la cantidad de buses en operación, su ubicación y estado (en movimiento o detenido en una estación). Para describir el estado del sistema y optimizar los tiempos de espera se utilizan los siguientes índices, parámetros y variables:

ÍNDICES Y CONJUNTOS:

- k Índice de los buses, $k = 1, \dots, U$.
- e Índice de las estaciones, $e = 1, \dots, E$.
- i, j Índices de las estaciones dentro de una matriz Origen-Destino, $i, j = 1, \dots, E$.
- $E_{k,k-1}$ Conjunto de estaciones que se encuentran entre el bus k y el $k - 1$.

PARÁMETROS:

- E Número de estaciones de la ruta.
- U Número de buses en operación en el momento en que se resuelve el modelo.
- Hd Headway deseado para los buses de la ruta (minutos).
- v_k Velocidad del bus k (metros por minuto).
- $d_{k,k-1}$ Distancia entre el bus k y el $k - 1$ (metros).
- Td_k Tiempo que el bus k lleva detenido en una estación. $Td_k = 0$ si el vehículo está en movimiento (minutos)
- α, β Tiempos de ascenso y descenso, respectivamente (minutos por pasajero).
- Tl_{ke} Tiempo de parada ejecutado por el bus k en la estación e al instante en que se resuelve el modelo (minutos).
- Th_{max} Tiempo máximo permitido para el Holding (minutos).
- C_k Capacidad de pasajeros del bus k .
- Mod_{ij} Cantidad de pasajeros que viajan de la estación i a la j dado por una matriz OD.

- Mod_i . Total de pasajeros que inician su viaje en la estación i dado por una matriz OD.
- $R_{k-1,e}$ Cantidad de pasajeros que ingresan en la estación e desde la partida del bus $k - 1$.
- To Instante en el que se resuelve el modelo (minutos desde el inicio de la operación).
- $ts_{k-1,e}$ Tiempo de salida del bus $k - 1$ de la estación e (minutos desde el inicio de la operación).
- e_k Primera estación del conjunto $E_{k,k-1}$ según el recorrido en la ruta.

VARIABLE DE DECISIÓN

- T_{ke} Tiempo de parada del bus k en la estación e que comprende el ascenso y descenso de pasajeros más el tiempo de *Holding* (minutos).

VARIABLES AUXILIARES

- $H_{k,k-1}$ *Headway* entre el bus k y el $k - 1$, tiempo estimado que le tomaría al bus k el llegar a la posición del bus $k - 1$ (minutos).
- Th_{ke} Tiempo de *Holding* para el bus k en la estación e (minutos).
- S_{ke} Cantidad de pasajeros que suben al bus k cuando este visita la estación e .
- B_{ke} Cantidad de pasajeros que descienden del bus k cuando este visita la estación e .
- V_{ke} Cantidad de pasajeros que viajan en el bus k cuando este se dirige a la estación e .
- D_{ke} Cantidad de usuarios que demandan la llegada del bus k en la estación e .
- $Q_{k-1,e}$ Cantidad de usuarios en la estación e que no abordaron el bus $k - 1$ ya que este se encontraba lleno y deben esperar la llegada de un próximo vehículo.
- P_{ke} Cantidad de usuarios que ingresarán a la estación e , desde el momento en que se resuelve el modelo, hasta la llegada del bus k .
- \hat{t}_{ke} Tiempo estimado para la llegada del bus k a la estación e (minutos).

FORMULACIÓN:

Minimizar

$$\sum_{k=2}^U |H_{k,k-1} - Hd| \quad (1)$$

Sujeto a:

$$H_{k,k-1} = \left(\frac{d_{k,k-1}}{v_k} \right) - Td_{k-1} + \sum_{e \in E_{k,k-1}} T_{ke} \quad \forall k \neq 1 \quad (2)$$

$$T_{ke} = \max(\alpha S_{ke} + \beta B_{ke} + Th_{ke} - Tl_{ke}, 0) \quad \forall k, \forall e \in E_{k,k-1} \quad (3)$$

$$Th_{ke} \leq Th_{max} \quad \forall k, \forall e \in E_{k,k-1} \quad (4)$$

$$S_{ke} = \min(C_k + B_{ke} - V_{ke}, D_{ke}) \quad \forall k, \forall e \in E_{k,k-1} \quad (5)$$

$$B_{ke} = \sum_{i=1}^{e-1} S_{ki} \left(\frac{Mod_{ie}}{Mod_i} \right) \quad \forall k, \forall e \in E_{k,k-1} \quad (6)$$

$$V_{ke} = \sum_{i=1}^{e-1} (S_{ki} - B_{ki}) \quad \forall k, \forall e \in E_{k,k-1} \quad (7)$$

$$D_{ke} = \frac{\sum_{j=e+1}^E Mod_{ej}}{Mod_e} (Q_{k-1,e} + R_{k-1,e} + P_{ke}) \quad \forall k, \forall e \in E_{k,k-1} \quad (8)$$

$$P_{ke} = \lambda_e \hat{t}_{ke} \quad \forall k, \forall e \in E_{k,k-1} \quad (9)$$

$$\lambda_e = \frac{R_{k-1,e}}{T_o - ts_{k-1,e}} \quad \forall k, \forall e \in E_{k,k-1} \quad (10)$$

$$\hat{t}_{ke} = \left(\frac{d_{ke}}{v_k} \right) + \sum_{i=e_k}^{e-1} T_{ki} \quad \forall k, \forall e \in E_{k,k-1} \quad (11)$$

$$Q_{ke} = Q_{k-1,e} + R_{k-1,e} + P_{ke} - S_{ke} \quad \forall k, \forall e \in E_{k,k-1} \quad (12)$$

En (1) se muestra la función objetivo a minimizar, la suma de las diferencias entre el *Headway* real entre cada par de vehículos y el *Headway* deseado en el sistema. El bus número 1 no se incluye en la sumatoria porque no posee un bus delante de él con el cual calcular su *Headway*. En (2) se calcula el *Headway* estimado, sumando el tiempo de recorrido del bus k , dado por el cociente entre $d_{k,k-1}$ entre v_k , con los tiempos de parada estimados T_{ke} en las estaciones del conjunto $E_{k,k-1}$, que visitará antes de alcanzar la posición del bus $k - 1$. En el conjunto $E_{k,k-1}$ se incluye la estación en la que se puede encontrar el bus k al momento de solucionar el modelo pero no la estación en la que pueda estar el bus $k - 1$ ya que esta última hace parte del conjunto $E_{k-1,k-2}$. Si al momento de resolverse el modelo, el bus $k - 1$ se encuentra detenido en una estación, el tiempo Td_{k-1} se resta para no sobrestimar la separación entre los buses.

El tiempo de parada (variable de decisión) de un bus k en una estación e se calcula al sumar el tiempo estimado de abordaje y descenso de los pasajeros, hallado como $\alpha S_{ke} + \beta B_{ke}$, y el tiempo de retención adicional Th_{ke} . Si el vehículo está en una estación, al momento del control, se resta el tiempo tl_{ke} que lleva detenido para que se considere únicamente el tiempo de espera no ejecutado. Si el tiempo de parada calculado es negativo, se asigna un tiempo de parada de cero como se ve en

(3). Se impone un límite superior a los tiempos de retención a calcular para evitar grandes retrasos en la operación de los buses en

(4). En

(5) se determina la cantidad de pasajeros que abordan un vehículo k , se considera la capacidad del bus C_k menos los V_{ke} pasajeros que viajan en el vehículo y se selecciona el mínimo entre la capacidad disponible, después del descenso de B_{ke} pasajeros, y el número de usuarios D_{ke} que desean abordar.

(6) calcula el número de pasajeros que descienden del bus en la estación e , a partir de la matriz OD, sumando la cantidad estimada de usuarios que se han subido al vehículo k en las estaciones anteriores y que tienen como destino la estación e . Con

(7) se obtiene el número de pasajeros que van viajando en un bus, como la diferencia entre los que se han subido y bajado en las estaciones anteriores a e . La demanda para el bus k es calculada en

(8), se suma la cantidad $Q_{k-1,e}$ de pasajeros que no pudieron acceder al bus $k - 1$, con el número $R_{k-1,e}$ de usuarios que han ingresado a la estación desde que salió el bus $k - 1$ y la cantidad

estimada P_{ke} de pasajeros que ingresarían en el intervalo de tiempo comprendido entre la solución del modelo y la llegada del bus k . Luego, se multiplica por la proporción de usuarios que viaja, según la matriz OD, desde la estación e a las demás estaciones a lo largo de la ruta con respecto al total de viajes en e .

P_{ke} se calcula en

(9), multiplicando la tasa de llegada λ_e con el tiempo estimado de viaje \hat{t}_{ke} del bus k , desde la posición actual en el momento de solución del modelo hasta la estación e . La tasa λ_e representa el nivel de llegadas de usuarios a la estación e y es obtenida en

(10) como el cociente del número $R_{k-1,e}$ de registros por ingreso en la estación e desde que salió el bus $k - 1$ y la diferencia de tiempo entre el momento To en que se aplica el modelo de control y la hora de salida $ts_{k-1,e}$ del bus $k - 1$. El tiempo estimado que le tomará al bus k llegar a la estación e desde su posición actual está dado por la ecuación

(11), d_{ke} es la distancia entre el bus k y la estación e ; la sumatoria de tiempos de parada en las estaciones inicia en la primera estación del conjunto $E_{k,k-1}$, denotada por e_k . Mediante la ecuación

(12) se calcula de forma recursiva la cantidad de usuarios $Q_{k,e}$ que queda en la estación, restando los que logran ingresar al vehículo del total de usuarios que estaban en la estación. Los parámetros S_{ke} , B_{ke} , V_{ke} , D_{ke} , Q_{ke} y P_{ke} son estimaciones de los verdaderos valores, obtenidas con información de venta de pasajes y la matriz OD.

TRANSFORMACIONES PARA LINEALIZAR CH

Este modelo no lineal, se linealiza mediante las siguientes sustituciones:

La función objetivo **(1)** se reemplaza por la ecuación **(13)** y se adicionan las restricciones

(14) y

(15). Donde θ_k es una variable auxiliar que representa la diferencia en valor absoluto entre el *Headway* de un vehículo y el *Headway* deseado en la operación del sistema.

$$\sum_{k=2}^U \theta_k \quad (13)$$

$$\theta_k \geq H_{k,k-1} - Hd \quad \forall k \neq 1 \quad (14)$$

$$\theta_k \geq Hd - H_{k,k-1} \quad \forall k \neq 1 \quad (15)$$

La restricción

(3) se reemplaza por las ecuaciones

(16) a

(19). Donde $x_{k,e}$ es una variable binaria la cual indica que el bus k ya ha cumplido con el tiempo de parada en la estación e (1, cuando el tiempo que lleva el vehículo detenido en la estación es mayor al nuevo tiempo de espera calculado por el modelo y el bus puede dejar la estación inmediatamente; 0, en caso contrario).

$$T_{ke} \geq \alpha S_{ke} + \beta B_{ke} + Th_{ke} - tl_k \quad \forall k, \forall e \in E_{k,k-1} \quad (16)$$

$$T_{ke} \leq \alpha S_{ke} + \beta B_{ke} + Th_{ke} - tl_k + Mx_{ke} \quad \forall k, \forall e \in E_{k,k-1} \quad (17)$$

$$T_{ke} \geq 0 \quad \forall k, \forall e \in E_{k,k-1} \quad (18)$$

$$T_{ke} \leq M(1 - x_{k,e}) \quad \forall k, \forall e \in E_{k,k-1} \quad (19)$$

$$x_{k,e} \quad \forall k, \forall e \in \{1,0\}$$

La restricción

(5) se sustituye por las ecuaciones

(20) a

(23). Donde $y_{k,e}$ es una variable binaria la cual indica que hay espacio disponible en el bus k para satisfacer la demanda en la estación e (1, cuando todos los pasajeros que esperan el bus k en la estación e pueden ingresar a él; 0, en caso contrario) y M es un valor muy grande ($M \gg 1$).

$$S_{ke} \leq C_k - V_{ke} + B_{ke} \quad \forall k, \forall e \in E_{k,k-1} \quad (20)$$

$$S_{ke} \geq C_k - V_{ke} + B_{ke} - My_{ke} \quad \forall k, \forall e \in E_{k,k-1} \quad (21)$$

$$S_{ke} \leq D_{ke} \quad \forall k, \forall e \in E_{k,k-1} \quad (22)$$

$$S_{ke} \geq D_{ke} - M(1 - y_{ke}) \quad \forall k, \forall e \in E_{k,k-1} \quad (23)$$

$$y_{ke} \quad \forall k, \forall e \in \{1,0\} \quad (24)$$

7.2 MODELO MATEMÁTICO DE CONTROL POR VELOCIDAD (CV)

El modelo de control por variación de velocidad tiene como objetivo mejorar el cumplimiento de una tabla horaria previamente establecida. Se minimiza la diferencia entre los tiempos de llegada estimados de los vehículos en operación respecto a los tiempos de llegada registrados dentro de una tabla horaria. Para esta última se emplea información de una matriz Origen-Destino, a partir de la cual se obtienen tasas de llegada y un promedio de usuarios que ascienden y descienden en cada estación. Los adelantos o retrasos respecto a los tiempos de llegada deseados en cada estación se corrigen modificando la velocidad de los vehículos, seleccionando dentro de un conjunto de velocidades de operación previamente definidas.

7.2.1 NOTACIÓN

Al momento de solucionar el modelo, se utiliza información de la cantidad de buses en operación, su ubicación y estado (en movimiento o detenido en una estación). Para describir el estado del sistema y optimizar las velocidades de operación se utilizan los siguientes índices, parámetros y variables:

ÍNDICES Y CONJUNTOS:

k	Índice de los buses, $k = 1, \dots, U$.
e	Índice de las estaciones, $e = 1, \dots, E$.
i	Índice de la velocidad asignada para un bus, $i = 1, \dots, I$.
V	Conjunto de velocidades de operación factibles para los buses

PARÁMETROS:

E	Número de estaciones de la ruta.
U	Número de buses en operación en el momento en que se resuelve el modelo.
I	Número de velocidades de operación factibles para los buses.
Tth_k	Tiempo de llegada del bus k a la siguiente estación que debe visitar, según la tabla horaria (minutos).
T_0	Tiempo actual, momento en que se soluciona el modelo de control (minutos desde el inicio de la operación del sistema).
W_k	Tiempo que le falta esperar al bus k , si éste se encuentra detenido en una estación al momento de solucionarse el modelo (minutos).
D_k	Distancia entre el bus k y la próxima estación a visitar en el recorrido (metros).
$v_{i,k}$	Velocidad i dentro del conjunto V que puede ser asignada para el bus k (metros por minuto).
Tla_k	Tiempo de llegada del bus k a la última estación visitada.
p	Periodo despacho de buses, tiempo entre la salida de dos vehículos consecutivos (minutos)
λ_e	Tasa de llegada para la estación e (usuarios por minuto).
est_k	Próxima estación que visitará el bus k , según el recorrido en la ruta.

VARIABLE DE DECISIÓN

$X_{i,k}$ Variable binaria que toma el valor de 1 cuando la velocidad i del conjunto V es asignada para que sea implementada por el vehículo k , hasta la siguiente iteración del modelo de control. 0, en caso contrario.

VARIABLES AUXILIARES

Tl_k Tiempo de llegada estimado del bus k a la siguiente estación (minutos).

$Tesp_{e,k}$ Tiempo promedio de espera del bus k en la estación e (minutos).

FORMULACIÓN:

Minimizar

$$\sum_{k=1}^U |Tl_k - Tth_k| \quad \forall k \quad (24)$$

Sujeto a:

$$Tl_k = T_0 + W_k + \sum_{i \in V} X_{i,k} \frac{D_k}{v_{i,k}} \quad \forall k \quad (25)$$

$$\sum_{i \in V} X_{i,k} = 1 \quad \forall k \quad (26)$$

$$W_k = \max(Tesp_{e,k} + Tla_k - T_0, 0) \quad \forall k, e = est_k \quad (27)$$

$$Tesp_{e,k} = p\lambda_e \quad \forall k, e = est_k \quad (28)$$

$$X_{i,k} \quad \forall i, k \in \{1,0\} \quad (29)$$

La función objetivo a minimizar en (24) es la suma de las diferencias entre el tiempo de llegada estimado de los buses a la próxima estación a visitar y el tiempo de llegada establecido por la tabla horaria del sistema. Para el cálculo de Tl_k en (25) se utiliza uno de los posibles tiempos de recorrido del bus k , dados por la división de D_k entre las varias velocidades $v_{i,k}$, la variable binaria $X_{i,k}$ permite seleccionar solo uno de estos tiempos y que su correspondiente velocidad sea implementada por el vehículo k . Al tiempo de recorrido se suma el tiempo actual de operación del sistema T_0 y un posible valor adicional W_k , por el tiempo de parada no ejecutado del vehículo k , si éste se encuentra detenido en una estación al momento de resolverse el modelo.

Mediante

(26) se garantiza que solamente una de las variables binarias tome un valor de 1 y se selecciona una velocidad óptima para cada bus. En

(27) se determina el tiempo de parada faltante para un vehículo si éste se encuentra detenido en una estación, se halla el máximo entre un tiempo faltante y cero, este tiempo es calculado como la suma del tiempo de espera en la estación y el tiempo de llegada a la misma, menos el tiempo actual. La comparación anterior es importante para evitar valores negativos en los tiempos. En

(28) se halla el tiempo espera promedio en una estación como la multiplicación de la tasa de llegada de usuarios por el tiempo que transcurre entre las visitas sucesivas de dos vehículos, el cual se toma de la frecuencia de despacho de buses en el sistema.

TRANSFORMACIONES PARA LINEALIZAR (CV)

Para linealizar este modelo se hace las siguientes sustituciones:

La función objetivo (24) se reemplaza por la ecuación

(29) y se adicionan las restricciones

(30) y

(31). Donde θ_k es una variable auxiliar que representa la diferencia en valor absoluto entre los tiempos de llegada.

$$\sum_{k=1}^U \theta_k \quad \forall k \quad (29)$$

$$\theta_k \geq Tl_k - Tth_k \quad \forall k \quad (30)$$

$$\theta_k \geq Tth_k - Tl_k \quad \forall k \quad (31)$$

La restricción

(27) se reemplaza por las ecuaciones

(32) a

(35). Donde Y_k es una variable binaria la cual indica que el bus k no ha cumplido con la totalidad del tiempo de parada en la estación en la cual se encuentra ($Y_k = 1$), o que el vehículo no está detenido en una estación sino que se encuentra en movimiento o a punto de salir de una estación ($Y_k = 0$). $M \gg 1$.

$$W_k \geq Tesp_k + Tla_k - T_0 \quad \forall k \quad (32)$$

$$W_k \leq Tesp_k + Tla_k - T_0 + MY_k \quad \forall k \quad (33)$$

$$W \geq 0 \quad \forall k \quad (34)$$

$$W \leq M(1 - Y_k) \quad \forall k \quad (35)$$

$$Y_k \quad \forall k \in \{1,0\} \quad (36)$$

7.3 SIMULACIÓN Y DISEÑO EXPERIMENTAL

7.3.1 DESCRIPCIÓN DE LA SIMULACIÓN

Para probar los modelos de control, se simularon en el software Anylogic™, utilizando información de la ruta 3 del sistema de transporte Megabús (ver Figura 1). La localización geográfica de las

estaciones se hizo mediante las capacidades GIS de Anylogic™ con Open Street Map. El corredor de la ruta se dibujó uniendo las estaciones entre sí mediante arcos trazados sobre los trayectos en el mapa.

La llegada de pasajeros se asume como un proceso de Poisson y los tiempos entre llegadas de pasajeros sucesivos en cada estación siguen una distribución exponencial. Lo anterior es apropiado en servicios que operan a alta frecuencia y tienen una periodicidad de despacho inferior a los 12 minutos (F. Delgado et al., 2012). Los modelos de control se alimentan con el número de pasajeros que ingresan en las estaciones, obtenidos mediante un generador de procesos aleatorios cuyo parámetro es una tasa de llegada de usuarios en cada estación, obtenida de una matriz Origen-Destino propuesta por (Jiménez & Soto, 2016). El ingreso de pasajeros a los buses se hace al terminar el descenso y va hasta que se la capacidad del vehículo sea completada o se dé satisfacción a la demanda. En el proceso de abordaje solo se tienen en cuenta a los pasajeros presentes en la estación en el momento de arribo del vehículo.

Los vehículos se simulan como agentes, cada uno con sus propias variables de estado, las estaciones son puntos a los cuales deben llegar los vehículos, cada llegada es un evento que modifica el estado de las estaciones y los buses. El momento en el cual se realiza el control puede encontrar a los vehículos en una de las tres siguientes situaciones: desplazándose entre dos estaciones, detenidos en una estación (abordaje y descenso de pasajeros) o esperando en la entrada de la estación a que parta otro vehículo que la ocupa, caso que corresponde a un apilamiento.



Figura 2. Mapa de la ruta 3 del sistema Megabús de Pereira - Colombia. Elaboración MEGABUS S.A.

En la simulación se lleva un registro en todas las estaciones de los tiempos de llegada de cada pasajero para el cálculo de los tiempos de espera. Pese a que en un sistema que opera a una alta frecuencia de despacho el tiempo de espera no es un factor determinante en la satisfacción de los usuarios, este puede utilizarse como un indicador de desempeño, conjuntamente con la carga de pasajeros en los vehículos ya que ambos se relacionan con la comodidad y la calidad del servicio.

En la Tabla 1 se puede encontrar las especificaciones de la ruta en mención, la distancia y el tiempo entre estaciones a una velocidad media de 5,3 m/s, en el orden que se muestra en la Tabla 1. Las estaciones San Fernando y Viajero, son estaciones dobles, es decir, que por ellas pasan buses que apenas empiezan su recorrido y también los que ya lo están finalizando, por tanto, en la Tabla 1 están repetidas al inicio y al final.

ESTACION	DISTANCIA (Km)	Tiempo (Minutos)
INTERCAMBIADOR CUBA	0.79	2.79
SAN FERNANDO	1.06	3.74
EL VIAJERO	1.00	3.53
AEROPUERTO	0.3	1.06
BATALLON	0.37	1.31
MARAYA	0.62	2.19
TURIN	0.35	1.23
EGOYA	0.39	1.38
COLISEO	0.28	0.99
ORMAZA	0.47	1.66
MERCADOS	0.39	1.38
EL LAGO	0.57	2.01
OTUN	0.38	1.34
VICTORIA	0.27	0.95
DEL CAFÉ	0.28	0.99
LIBERTAD	0.2	0.71
VIADUCTO	0.52	1.83
CENTRAL	0.6	2.12
CLARET	0.31	1.09
CAÑARTE	0.4	1.41
LAS FLORES	0.35	1.23
BANDERAS	0.45	1.59
PALACIO DE JUSTICIA	0.38	1.34
RUANA	0.57	2.01
MARAYA	0.4	1.41
BATALLON	0.27	0.95
AEROPUERTO	0.88	3.10
EL VIAJERO	0.97	3.42
SAN FERNANDO	0.92	3.25
INTERCAMBIADOR CUBA	14.74	52.00

Tabla 1. Especificaciones físicas de la ruta troncal 3 de Megabus.

Para la solución de los modelos de programación lineal mixta presentados en la sección anterior, al *software AnyLogic™* (versión 7.3.6) se le integro la librería *SCPSolver* para JAVA, la cual utiliza el *solver LPSolve*. La solución obtenida se escribe en variables temporales asignadas a cada estación en el caso del modelo de Holding y a cada bus en operación en el modelo de control velocidades. Los modelos de control se resolvieron a intervalos de dos minutos, tiempo adecuado para un balance entre la frecuencia y ejecución de las acciones de control y la carga computacional.

7.3.1.1 ESCENARIO DE ANÁLISIS

Para comparar los modelos de control tuvo en cuenta: frecuencia de despacho de vehículos (media y alta), nivel de demanda (medio y alto) y Tipo de control, Sin Control (SC), Control Holding (CH) y Control Velocidad (CV) (ver

Tabla).

Se obtiene 6 escenarios de análisis acordes con la operación real, la frecuencia de despacho y nivel de demanda son parámetros correspondientes, es decir, un nivel de demanda alto (nivel 3) coincide con una frecuencia alta (despacho cada 3 minutos), igualmente, para un nivel de demanda medio (nivel 2) la frecuencia de despacho también será media (despacho cada 5 minutos), de esta forma siempre que se mencione un nivel de demanda en un escenario de análisis se debe entender que el despacho de los vehículos es congruente al nivel de demanda. Por tanto, cada escenario de demanda (media y alta) será analizado sin control, y los dos tipos de control. Para el análisis se realizaron 30 corridas en cada uno de los 6 escenarios, simulando tres horas de operación del sistema (180 minutos). Se empleó un tiempo de calentamiento de quince minutos, necesario para analizar el impacto de la estrategia de control y comparar cómo se mejoran los índices de desempeño de la operación a partir de un estado que se puede considerar irregular, como el utilizado en (F. Delgado et al., 2012).

Los siguientes indicadores fueron analizados en cada uno de los escenarios: tiempo de apelonamiento total, tiempo de espera total de los pasajeros, tiempo de recorrido o ciclo y

capacidad de los buses al llegar a cada una de las estaciones. Se considera que dos vehículos entran en apelotonamiento sí la distancia entre ellos puede ser recorrida en 15 segundos o menos. Para el modelo de control de velocidad se tiene tres velocidades factibles dentro de la operación (3.3 m/s, 5.3 m/s y 8.3m/s) y para el modelo de control por Holding, la velocidad es constante 5.3m/s.

A continuación, se muestra Tabla 1 que resumen los parámetros utilizados en los modelos de control:

Parámetros fijos entre corridas		Valor	
Tiempo de subida y bajada de cada usuario		3 segundos	
Duración de la simulación		180 minutos	
Velocidad de los vehículos (m/s)		3.3, 5.3, 8.3	
Capacidad de los vehículos		160 pasajeros	
Sensibilidad del apelotonamiento (segundos)		Menor a 15	
Tiempo máximo de Holding		30 segundos	
Variables del experimento	1	2	3
Nivel de demanda	Alta (3)	Media (2)	
Tiempo entre la salida de vehículos	3 min	5 min	
Tipo de Control	Sin control (SC)	Control Holding (CH)	Control velocidad (CV)

Tabla 2. Parametrización del experimento de simulación

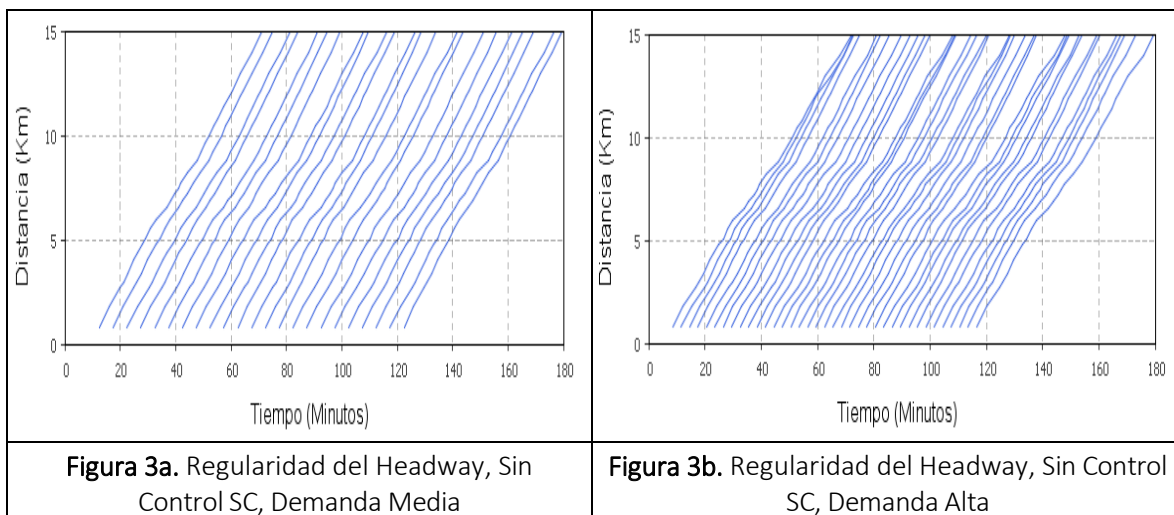
7.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.4.1 REGULARIDAD DEL HEADWAY

En este apartado se analiza el comportamiento del avance de los buses (Headway), para dos escenarios diferentes de demanda (mediana y alta).

En las **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Se muestra en el eje horizontal el tiempo de simulación (180 minutos) y en el eje vertical se muestra la distancia que han recorrido los buses. Cada línea corresponde al avance que ha tenido cada uno de los buses en operación en el tiempo de simulación, para un escenario de demanda alta y despacho cada 3 minutos.

Cuando no existe ninguna estrategia de control, las distancias entre vehículos no se conservan y los buses tienden a apilotonarse, esto se evidencia cuando las líneas que marcan el desplazamiento de los buses tienden a juntarse (figura 2b), lo que indica que dos buses están en el mismo lugar al mismo tiempo. Se puede observar irregularidades en los desplazamientos, similares para ambos escenarios de demanda media y alta, aunque, como es de esperarse, el escenario de demanda media presenta menor variación en el desplazamiento, debido a que los buses tendrán más distancia entre sí cuando empiezan su recorrido, y por tanto se necesita mayores perturbaciones para que el sistema presente apilotonamientos. Por el contrario, en el escenario de demanda alta sí se observa la formación de apilotonamientos, que implican además grandes distanciamientos entre buses consecutivos.



Cuando se aplica la estrategia de control Holding, se puede ver que, en ambos escenarios de demanda, se mejora la irregularidad de los intervalos respecto al escenario sin control y entre las dos, se observa más regularidad en la 4a, es decir, el control por Holding aparentemente resulta más efectivo para mantener intervalos regulares entre buses consecutivos cuando los intervalos de salida son más grandes. También se puede ver que este modelo de control genera una reducción sustancial de los apelotonamientos, puesto que la separación de los vehículos no tiende a disminuir (ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). Escenarios de demanda alta muestra mayor irregularidad sin embargo sí se comparan con el escenario sin control, se puede observar que las perturbaciones más críticas han sido mitigadas, y por tanto se observa que la estrategia de control cumple su objetivo.

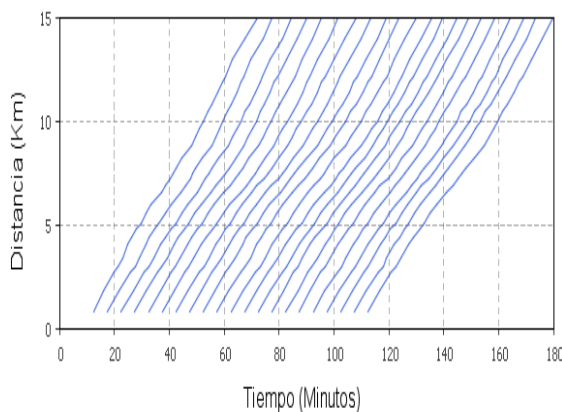


Figura 4a. Regularidad del Headway, Control Holding CH, Demanda Media

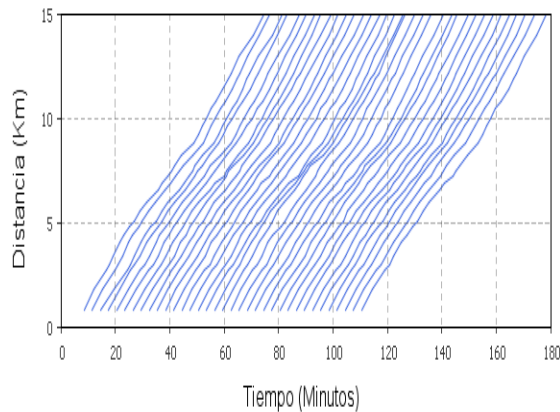


Figura 4b. Regularidad del Headway, Control Holding CH, Demanda Alta

El modelo de control por velocidad, nuestra mayor irregularidad en el avance de los buses durante su recorrido, en ambos escenarios se observa un comportamiento similar si se compara los dos modelos de control, ya que, en demanda media, las distancias entre los buses tienden conservarse, y en el escenario de demanda alta, se observa más irregularidad en el avance, sin embargo, es evidente que el modelo de control Holding presenta un mejor desempeño. Por tanto, en escenarios de demanda alta si la prioridad es conservar la regularidad de los avances en los recorridos que los buses, el modelo más apropiado es el de Holding, mientras que en un escenario de demanda media, los modelos se comportan de forma similar, la obstante, como se verá más adelante, el modelo de control por velocidad, retrasa menos la operación, y por tanto, se traducirá en tiempos de viaje más cortos para los usuarios, y también reducirá el tiempo espera, concluyendo que para un escenario de demanda media, es mejor aplicar control por velocidad.

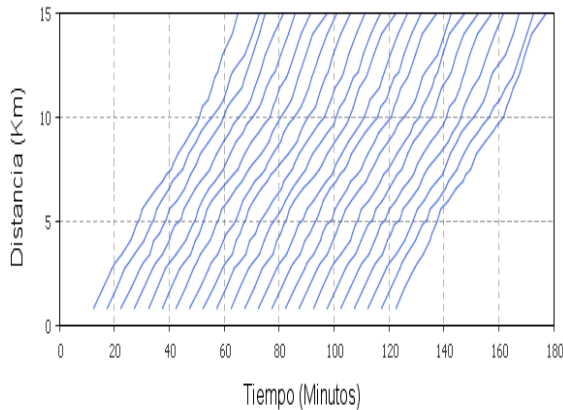


Figura 5a. Regularidad del Headway, Control Velocidad CV, Demanda Media

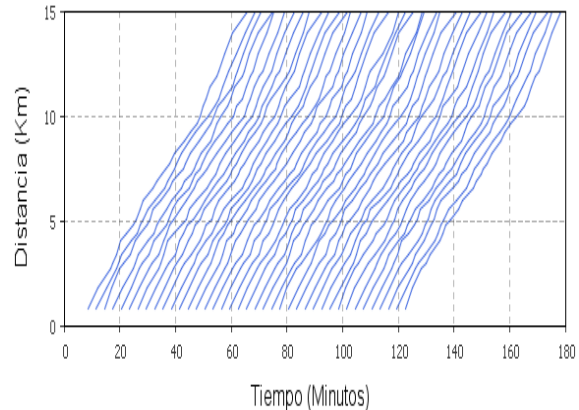


Figura 5b. Regularidad del Headway, Control Velocidad CV, Demanda Alta

7.4.2 DISTRIBUCIÓN DE LA CARGA DE PASAJEROS

Por otra parte, cuando se analiza la distribución de los pasajeros durante el recorrido que hacen los buses en la ruta, se puede observar dos características importantes: la capacidad de los buses cuando llegan a las estaciones y la variabilidad de las mismas. La primera característica muestra en qué segmento de la ruta los buses alcanzan su capacidad máxima, es decir, van más llenos. Y la segunda característica muestra qué tan uniforme puede ser esa carga para todos los buses que circulan por esa ruta, esta característica es útil ya que influye directamente en el tiempo que un bus debe esperar la estación, por tanto, sí hay mayor variabilidad, hay mayor perturbación en el avance de los buses y mayor probabilidad de que se generen apelotonamientos.

Cuando se analiza esta variable para el sistema no controlado se puede observar que, en ambos escenarios de demanda media y alta, la variación en la capacidad de los buses es similar, siendo las primeras estaciones en las que los buses pasan más llenos y las estaciones del medio de la ruta tienden a pasar con más de la mitad de su capacidad disponible (ver figura 6a y 6b). Esto quiere decir que las estaciones del medio son las que más demanda atraen y por tanto muchos usuarios se bajan en estas liberando capacidad en los buses. Esta variable es útil como indicador para definir qué modelo de control tiene mejor desempeño en lograr más regularidad en el avance de los buses (Headway), menor variabilidad entre los tiempos de la programación de llegada de los buses a las estaciones y los reales que se dan durante la operación.

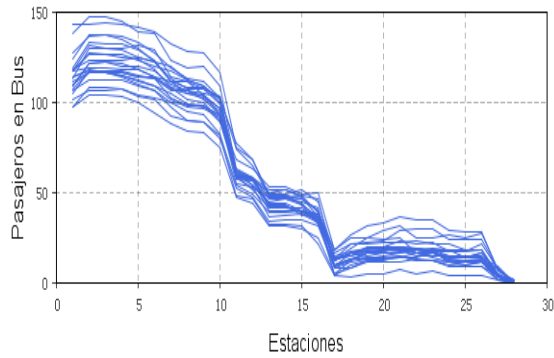


Figura 6a. Distribución de la carga de pasajeros, Sin Control SC, Demanda Media

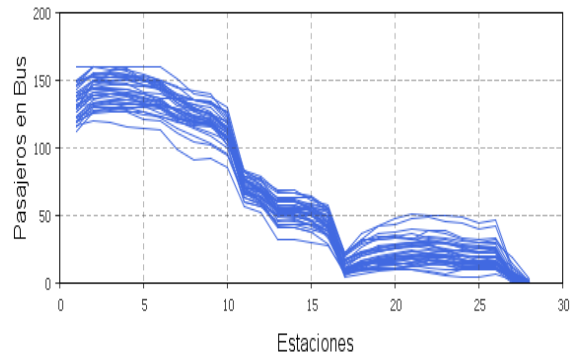


Figura 6b. Distribución de la carga de pasajeros, Sin Control SC, Demanda Alta

En el modelo de control por Holding, la variación en las capacidades de los buses no muestra una diferencia apreciable para todas las estaciones ver figuras (7a y 7b). En ambos escenarios se observa comportamientos comparables con el escenario sin control. No obstante, la variable tiempo de espera que se analiza más adelante, está relacionada con la distribución de carga de pasajeros, la cual si muestra diferencias significativas para ambos escenarios.

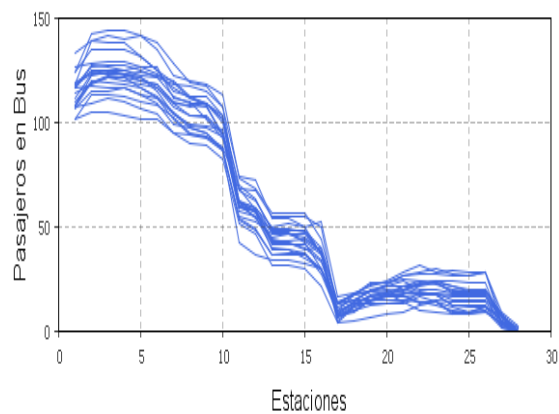


Figura 7a. Distribución de la carga de pasajeros, Control Holding CH, Demanda Media

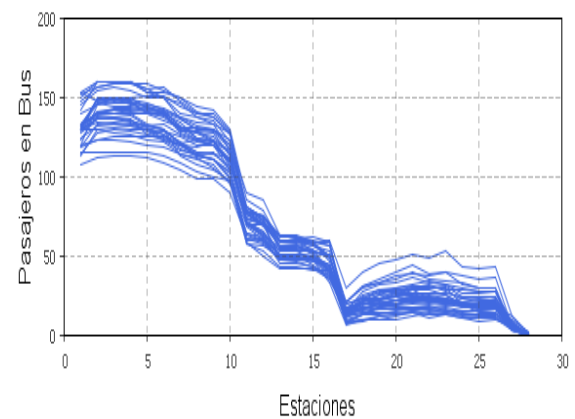


Figura 7b. Distribución de la carga de pasajeros, Control Holding CH, Demanda Alta

El escenario con control de velocidad presenta un comportamiento similar al control por Holding, ya que en las primeras estaciones los buses alcanzan su capacidad máxima, en el escenario de demanda media se da una variación similar en la capacidad de los buses. Es notable que la distribución de la demanda para los dos escenarios de demanda se comporta de forma similar en ambos modelos de control, así entonces.

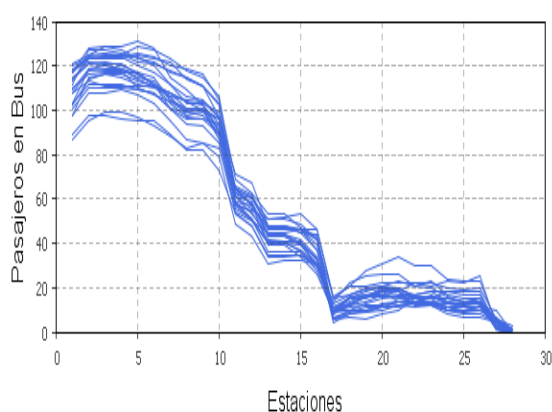


Figura 8a. Distribución de la carga de pasajeros, Control Velocidad CV, Demanda Media

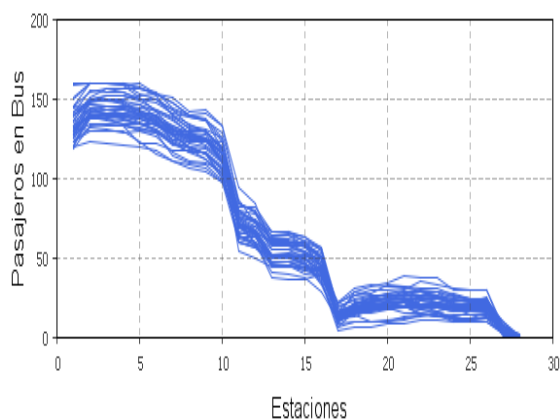


Figura 8b. Distribución de la carga de pasajeros, Control Velocidad CV, Demanda Alta

7.4.3 TIEMPO PROMEDIO DE CICLO O RECORRIDO

El indicador del tiempo de recorrido se calcula haciendo un promedio del tiempo que cada bus se demora en finalizar su recorrido, al final de cada corrida se obtiene el promedio de todos los buses que hayan completado recorrido en los 180 minutos. La figura 9. muestra el comportamiento de esta variable para las 30 repeticiones realizadas de los 6 escenarios simulados. En el eje vertical se muestra el tiempo promedio en el cual los buses llegan final del recorrido. En el eje horizontal se muestra cada una de las corridas. Los escenarios corresponden a una frecuencia de servicio alta (FA), demanda media (DM), demanda alta (DA), sin control (SC), con control por holding (CH) y con control de velocidad (CV). Las líneas punteadas corresponden a un escenario con frecuencia alta y las líneas continuas demanda media.

Se aprecia en la figura, que la estrategia de control por holding, produce tiempos de recorrido mayores en ambos escenarios. Lo anterior es una consecuencia del tiempo que adiciona el control al intentar

mantener la separación entre los vehículos para contribuir a un avance de los buses regular. El escenario con control de velocidad muestra tiempos de recorridos menores, y para todos los casos el tiempo de recorrido es menor, si se compara el despacho a frecuencia alta.

Se puede observar que para la estrategia de control por holding, el tiempo de recorrido es similar en ambos escenarios de demanda, debido a que, los tiempos entre salida de los buses son mayores (cinco minutos) si se comparan con el escenario de demanda alta (tres minutos), por tanto, es mayor el tiempo que se demora en pasar nuevamente un bus en una estación dejando acumular mayor demanda, lo que produce tiempos de parada similares en las estaciones.

Caso contrario ocurre con el modelo de control por velocidad, debido a que este se enfoca en cumplir con una programación y su acción de control aumenta la velocidad de los buses en los recorridos si éstos están retrasados. Lo anterior ocurre debido a la diferente naturaleza de los modelos de control en comparación, puesto que, el modelo de control por holding retrasa el avance de los vehículos para controlar las irregularidades en la separación de los buses, mientras que el modelo de control por velocidad tiende a incrementar la rapidez en el avance de los recorridos para contrarrestar las perturbaciones ocurridas en operación, y por tanto su objetivo se centra en cumplir un cronograma de alcance de los buses a las estaciones.

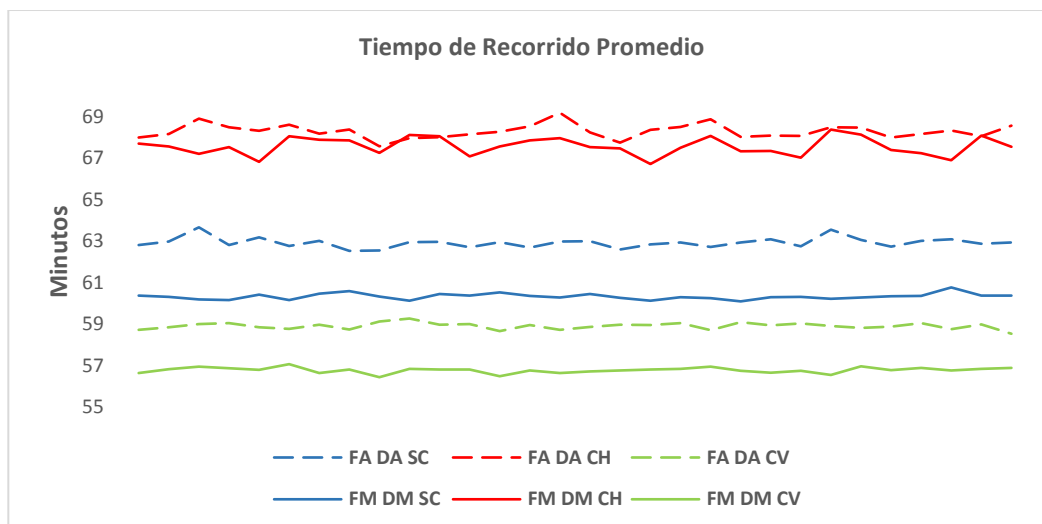


Figura 9. Variación del Tiempo de Recorrido promedio por escenario.

7.4.4 TIEMPO DE APELTONAMIENTO TOTAL

Otro indicador utilizado para comparar el desempeño de los modelos de control es el tiempo de apelotonamiento total para los dos escenarios de demanda media y alta (ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

Lo primero que se puede notar es que el escenario sin control para un escenario de demanda alta es el que mayor tiempo de apelotonamiento produce, lo que concuerda claramente con lo observado en la figura 2b, donde se mostró mayor irregularidad en los avances y separación de los buses durante su recorrido. También se puede observar el impacto que se tiene en este indicador al aplicar algunos de los dos modelos de control, encontrando un mejor desempeño para el modelo de control por holding.

Se observa que en los escenarios con demanda media, el tiempo de apelotonamiento es nulo cuando se utiliza alguno de los dos tipos de control, sólo el escenario sin control fue el único que produjo apelotonamientos esporádicos en alguna de las corridas. De acuerdo al anterior, se puede decir entonces que el escenario de demanda media es menos sensible a la acumulación de buses dado que se necesitan altas perturbaciones durante los recorridos para producir los apelotonamientos. En este caso ambos dos modelos de control son igualmente efectivos para prevenir ese tipo de fenómeno.

Sin embargo, el modelo de control por velocidad como se vio anteriormente, mejora reduce a la vez los tiempos de recorrido, y por tanto aporta mayores beneficios al ser aplicado en un escenario de demanda media.

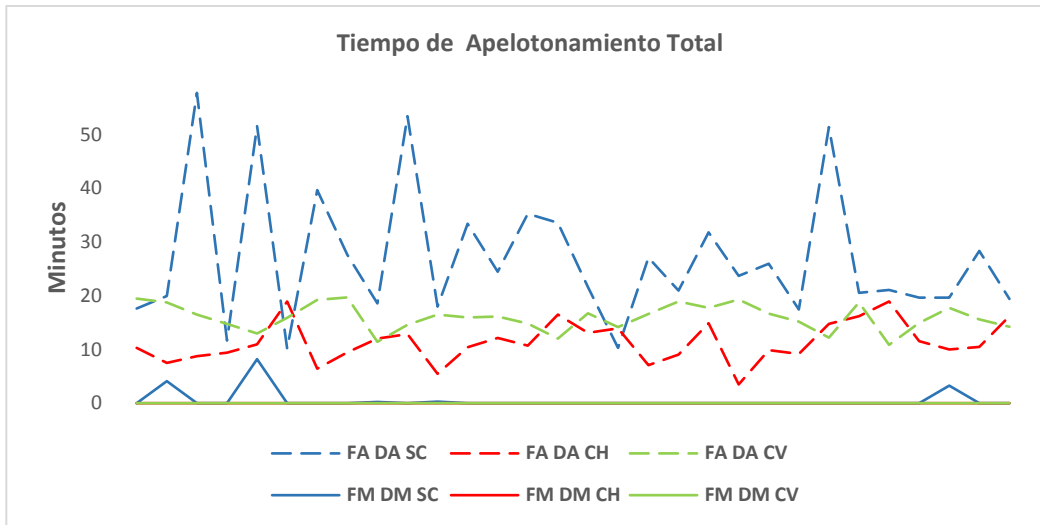


Figura 10. Variación del Tiempo de Apelotonamiento acumulado por escenario.

7.4.5 TIEMPO DE ESPERA TOTAL.

Esta es una de las variables que más se busca reducir en los trabajos de investigación relacionados. Para los sistemas de transporte, el tiempo de espera total es un factor que se requiere minimizar siempre junto con el costo de la operación, sin embargo, es clara la naturaleza contrapuesta de los dos objetivos mencionados. Para un análisis más detallado de esta variable en ambos escenarios de demanda media y alta, se dividió en dos gráficas, puesto que hay una marcada diferencia de magnitud entre un escenario y otro.

Para un nivel de demanda media y despacho de buses cada 5 minutos, el tiempo de espera total varía de forma similar en los tres escenarios de control (SC, CH y CV), ver figura 11a. de tal forma que no se distingue qué modelo de control presenta mejor desempeño. De igual forma, bajo una demanda alta se observa que hay casos en donde el tiempo de espera se incrementa mucho para los tres escenarios de control. Por tanto, se dificulta visualmente establecer qué tipo de control es más atractivo para aplicar en ambos escenarios de demanda. Se resalta que el escenario de demanda alta presenta situaciones donde no hay variación significativa en los tiempos de espera, es decir el sistema permanece estable y no presenta crecimientos atípicos de la variable espera

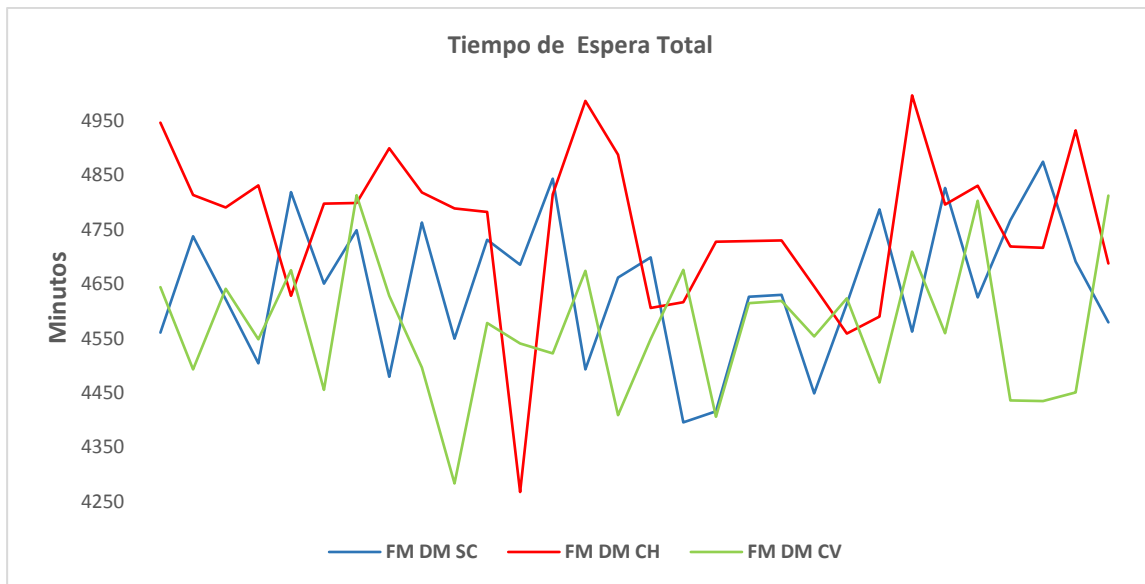


Figura 11a. Variación del Tiempo de Espera Total, para el escenario de demanda Media

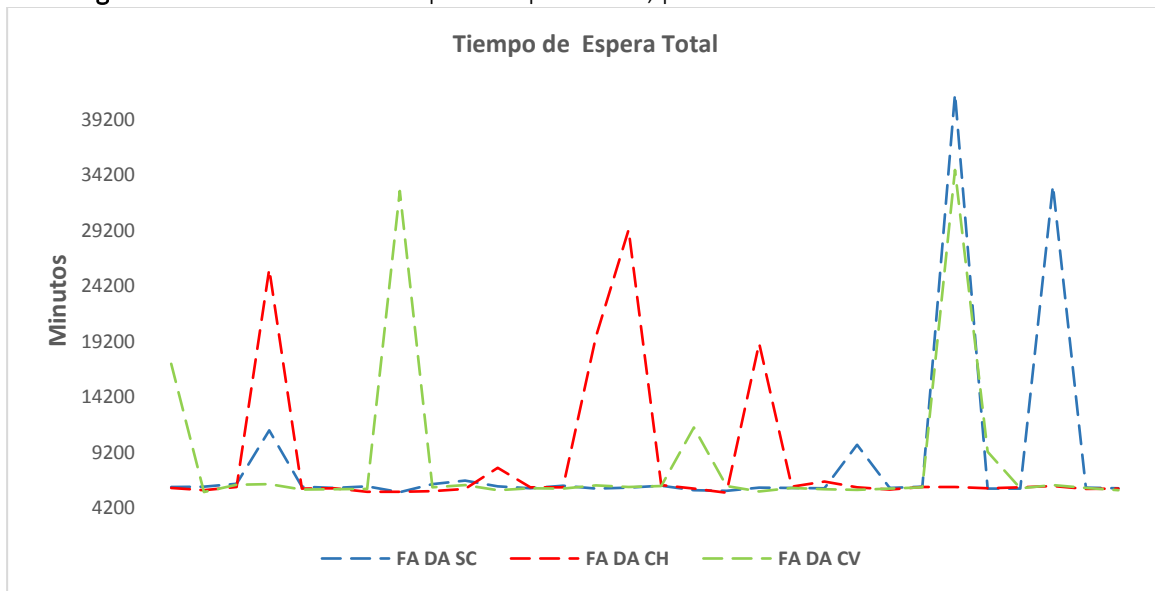


Figura 11b. Variación del Tiempo de Espera Total, para el escenario de demanda Alta

Dado que el comportamiento de la variable para los dos escenarios de demanda es difícilmente diferenciable, en el siguiente aparte se hace una simplificación de estos indicadores para los dos niveles de demanda en cada uno de los escenarios de control.

7.4.5.1 RESUMEN DE LOS INDICADORES DE SERVICIOS TRAVÉS DE MEDIDAS DE CENTRALIDAD Y VARIABILIDAD

un análisis más acertado para cada una de las variables anteriormente mencionadas es propuesto con el cálculo de un estadístico de tendencia central y de variabilidad como se muestran en la Tabla 2.

Variable	Estadístico	Demanda: Media			Demanda: Alta		
		Despacho: 5 min			Despacho: 3 min		
		SC	CH	CV	SC	CH	CV
Tiempo Recorrido	Mediana	60,3	67,5	56,8	62,9	68,3	59,0
	Des. Est.	0,15	0,43	0,14	0,2	0,3	0,2
Apelotonamiento	Mediana	0,0	0,0	0,0	22,7	10,6	16,0
	Des. Est.	1,7	0,0	0,0	12,5	3,7	2,4
Tiempo de Espera	Mediana	4641	4790	4557	6091	6088	6055
	Des. Est.	130	148	127	8019	6217	7221

Tabla 3. Calculo de estadísticos para los escenarios simulados.

La Tabla 2. presenta la mediana calculada como un indicador de tendencia central, debido a que los datos no siguen una distribución conocida y además hay presencia en algunos escenarios de control de valores atípicos, para cada una de las variables analizadas. Con el fin de hacer los análisis más simplificados, se graficó cada uno de los estadísticos calculados como se muestra a continuación:

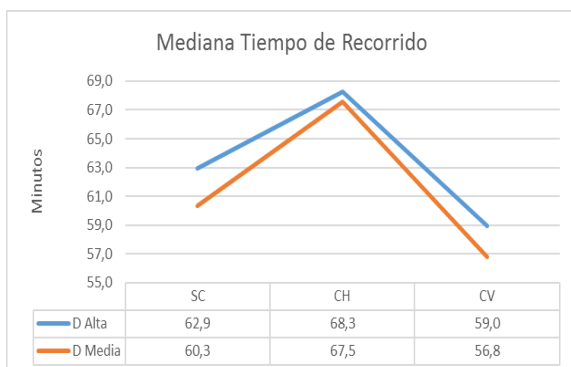


Figura 12a. Variacion de la Mediana para el Tiempo de Recorrido

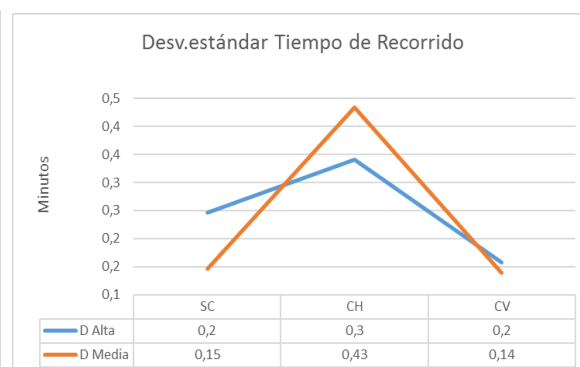


Figura 12b. Desviación Estándar para el Tiempo de Recorrido

Las figuras 12a y 12b muestran la media y desviación estándar del tiempo de recorrido, para los dos escenarios de demanda. En el eje vertical se muestra el tiempo de la variable analizada y en el eje horizontal cada uno de los escenarios relacionados al método de control aplicado.

Se puede apreciar que el modelo de control por velocidad es el que mejor desempeño tiene y además el que menor variabilidad presenta, y por tanto resulta más conveniente para lograr tiempo de ciclos más cortos. Por otra parte, el modelo de control por holding es el que menor desempeño presenta en ambos estadísticos.

No obstante, En la gráfica 13a se observa que, en el escenario de despacho cada 3 minutos, el modelo de control de velocidad (CV) produce más apelotonamiento que el modelo de control por holding (CH), por tanto, es más efectivo para mitigar el fenómeno de acumulación de buses. por otra parte, en el escenario con despacho cada cinco minutos, es más conveniente el control por velocidad. Lo anterior, se puede atribuir a que, al tener intervalos de despacho amplios, es más difícil que los buses lleguen a un estado de apelotonamiento, por tanto, es mejor tener una estrategia que mejore los tiempos de ciclo, en contraste, con un tiempo de despacho de tres minutos, donde es más factible que los buses se estorben entre sí, y por tanto, resulta más provechosa una estrategia que tenga como objetivo mantener la distancia regular entre los buses.

En el escenario de demanda media, los dos modelos de control presentan el mismo desempeño puesto que en ambos casos no se observó surgimiento de este fenómeno en todas las corridas hechas en la simulación

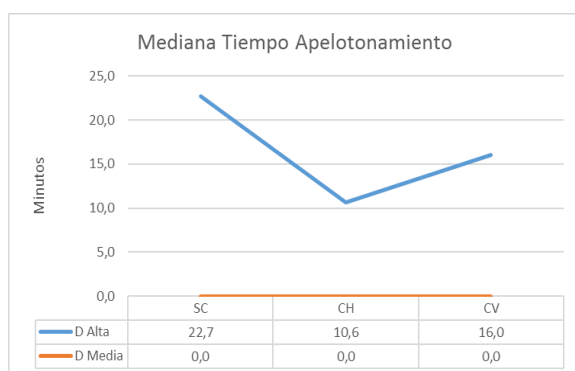


Figura 13a. Variacion de la Mediana para el Tiempo de Apelotonamiento

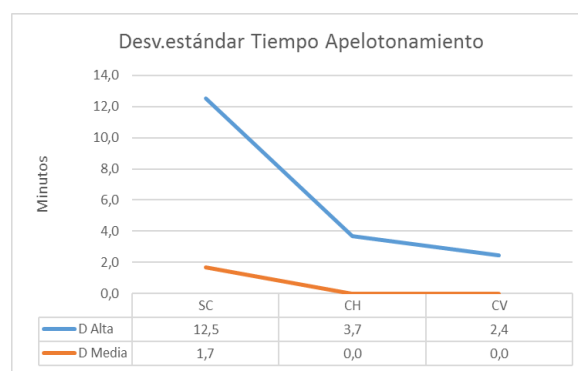


Figura 13b. Desviación Estándar para el Tiempo de Apelotonamiento

El modelo de control por velocidad presenta mejor desempeño respecto al tiempo de espera bajo un escenario de demanda alta si se tiene en cuenta el comportamiento de sus medianas, ver figura 14a. no obstante, para este mismo contexto de demanda el modelo de control por Holding presenta menor

variabilidad ver figura 14b, por lo que este análisis tampoco muestra diferencias significativas para ambos modelos.

Sin embargo, en el escenario de demanda media sí se puede apreciar diferencias significativas, con un mejor desempeño para el control por velocidad puesto que presenta una mediana de tiempo de espera menor (ver figura 14a) y menor variabilidad (ver figura 14b) al ser comparado con los resultados del modelo por holding.

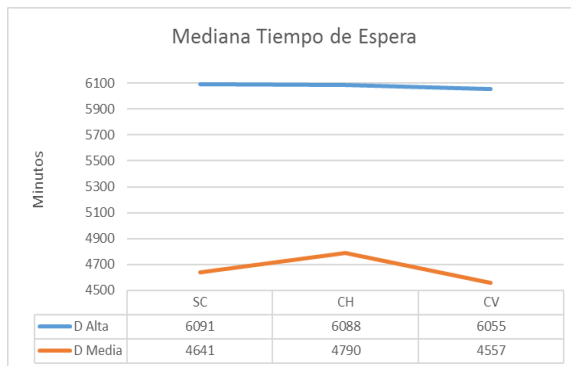


Figura 14a. Variacion de la Mediana para el Tiempo de Espera

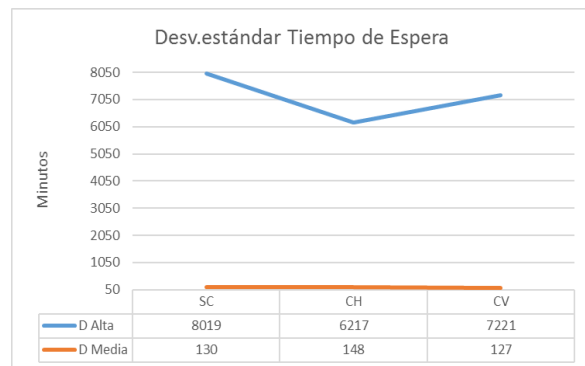


Figura 14b. Desviación Estándar el Tiempo de Espera

Con lo anterior se puede resaltar las fortalezas y debilidades de los modelos frente a las variables analizadas en:

El modelo de control por Holding es conveniente para reducir el tiempo de apaltonamiento y de espera en el escenario de demanda alta, sin embargo, genera tiempos de recorridos más grandes, en ambos escenarios de demanda.

El modelo de control por velocidad hace que la operación tenga tiempos de ciclo o recorridos más cortos, lo que es conveniente para disminuir costos de operación. Sin embargo, presenta menor desempeños en la prevención de apaltonamiento, lo que produce mayor variación en la carga de pasajeros y por tanto no se impacta el indicador de tiempos de espera.

Ambos modelos de control presentan un desempeño similar en el escenario de demanda media, para las variables tiempo de apilamientos, pero el modelo de control por velocidad tiene una mejor repercusión en el tiempo de espera.

Dado que la variable tiempo de espera no es lo suficientemente clara para diferenciar que tipo modelo control es más conveniente aplicar, a continuación, se muestra un diseño experimental para ajustar un modelo de regresión.

7.4.5.2 MODELO DE REGRESIÓN PARA TIEMPO DE ESPERA TOTAL

El modelo de regresión lineal que se ajustó se describe en la ecuación (36). Donde la variable respuesta corresponde al indicador de interés (Tiempo de Espera), y las variables regresoras c_i y d_j son, respectivamente, los efectos producidos por el nivel i –ésimo del factor tipo de control y por el nivel j –ésimo del factor Nivel de demanda y $(cd)_{ij}$, los efectos producidos por las interacciones de segundo orden entre los factores. El subíndice l denota la réplica o repetición de la simulación.

$$E_{ijl} = \mu + c_i + d_j + (cd)_{ij} + \varepsilon_{ijl} \quad \begin{matrix} i, j = 1, 2 \\ l = 1, 2, \dots, 30 \end{matrix} \quad (36)$$

Para validar el modelo y lograr las condiciones de normalidad y homocedasticidad de los residuales fue necesario transformar la variable respuesta, obteniendo la raíz cuadrada de la misma. En la Tabla 3 se presentan las hipótesis probadas en el análisis de varianza y los respectivos P-valores.

Para la prueba de hipótesis de los efectos de los niveles de cada factor (tipo control y nivel demanda) se obtuvo un P-valor inferior al nivel de significancia fijado en $\alpha = 0,05$. Por tanto, se tiene evidencia estadística suficiente para rechazar la hipótesis nula y afirmar que sí hay diferencias significativas sobre el tiempo de espera total, entre los efectos de usar modelo de control por *Holding* o el control de velocidad.

Hipótesis nula	Descripción de la hipótesis	P-valor
$c_1 = c_2 = 0$	Los efectos de los niveles del factor control son cero	$< 2,2 \times 10^{-16}$
$d_1 = d_2 = 0$	Los efectos de los niveles del factor nivel de demanda son cero	$< 0,0008922$
$(cd)_{ij} = 0 \forall i, j$	No existe interacción entre el control y el nivel de demanda.	1.052×10^{-5}

Tabla 4. Resultados de las pruebas de hipótesis del ANAVA del modelo.

Además se comprobó estadísticamente la existencia de interacción entre los factores Control y Nivel de demanda, con un P-valor de la prueba de 1.052×10^{-5} . Lo anterior indica que la diferencia entre el efecto de aplicar control por holding o control por velocidad sobre el tiempo de espera en un escenario con demanda media no es la misma que en un escenario con demanda alta.

Lo anterior se representa en la **Figura** , en donde se observa, mediante las pendientes de las rectas, que la diferencia de medias del tiempo de espera aplicando control por Holding y control por velocidad, es distinta en los niveles de demanda Media y Alta, obteniendo un desempeño mejor el modelo control de velocidad para demanda media y que ambos controles se comportan similar para un escenario de demanda alta.

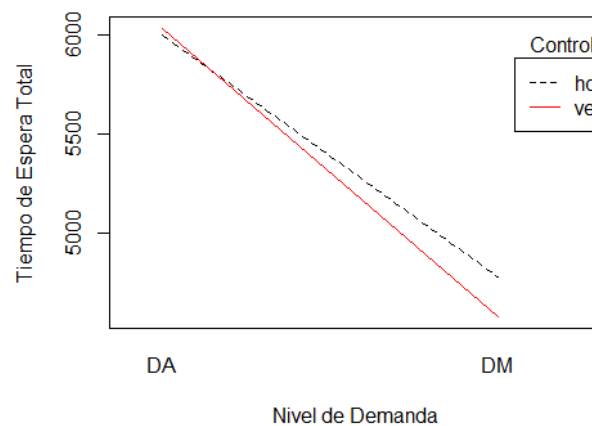


Figura 15. Interacción entre los factores Control y Nivel de demanda.

Es notable que cuando se considera los tipos de control, los promedios de tiempo de espera cambian en el escenario de demanda media, lo cual se puede constatar al aplicar las comparaciones múltiples con la prueba de Tukey, por el contrario, en el escenario de demanda alta, el tiempo de espera no

presenta cambios significativos para ambos modelos de control, como se puede apreciar en la figura 15. Por tanto, el escenario de demanda alta no tiene cambios significativos al aplicar cualquier tipo de control.

8. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

En el presente trabajo se definió un contexto virtual que representa la ruta tres del sistema integrado de transporte Megabús en la ciudad de Pereira – Colombia. Este contexto virtual permite simular la operación del sistema de transporte con suficiente detalle debido que se ubicaron estaciones y recorridos de forma georreferenciada. El objetivo de la simulación fue la comparación entre dos estrategias de control (Holding y velocidad) para un sistema de transporte tipo BRT, utilizando la frecuencia de salida de los buses e información de operación como la venta de pasajes y la matriz Origen-Destino. En ambos casos se resuelve un modelo de programación lineal que permite establecer estrategias de control óptimas propias de cada modelo de control.

Los resultados de las simulaciones muestran que, bajo ciertas condiciones, es mejor aplicar un modelo de control por holding, y en otras es mejor el modelo de control velocidad. En el escenario de demanda media, es más apropiado aplicar el modelo de control por velocidad, ya que en este los tiempos entre salida son más amplios (cinco minutos) y por tanto, es más difícil que las perturbaciones propias de la naturaleza del sistema como la variación de la demanda, tiempos de parada y tiempos de recorrido generen apilamientos. Por esta razón, en este tipo de escenarios se deben priorizar el avance de los recorridos y no el distanciamiento entre los buses.

En un escenario de demanda alta, el fenómeno del apilamiento se debe priorizar puesto que los buses tienen un intervalo de tiempo entre salida menor y la acumulación de pequeñas perturbaciones hace del sistema muy vulnerable a la aparición de apilamiento de buses en las estaciones. En ese aspecto, el modelo de control por holding mostró un mejor desempeño en lograr menor variabilidad en el avance de los buses y por ende en su distanciamiento. Por tanto, en escenarios de demanda alta, es muy importante para la operación mitigar la variabilidad del avance de los buses, deteniéndolos en las estaciones con el fin de sincronizar la flota de buses para minimizar la acumulación de buses, aunque esto repercuta en tiempos de recorrido más grandes. Además, para un nivel de servicio alto, los pasajeros experimentan un menor tiempo de espera entre

buses y por tanto, esta variable no crítica para la satisfacción del usuario como también la variación de los tiempos de llegada de los buses a las estaciones respecto de su programación.

Ambos modelos de control muestran sus ventajas dependiendo de las diferentes circunstancias referentes a la operación, los intervalos de despacho entre buses, son muy importantes para determinar el tipo un control más apropiado, el modelo de control por holding mantiene intervalos regulares pero retrasa la operación, este modelo es más apropiado para aplicar bajo operaciones de alta frecuencia, mientras que el modelo de velocidad, no mantiene intervalos tan regulares, es decir, hay mayor variabilidad, sin que haya apelotonamiento, pero mejora los tiempos de ciclo.

El trabajo futuro puede enfocarse en identificar el impacto de los modelos de control mencionados en un contexto con múltiples rutas. Además, los modelos de control mostrados requieren la definición de parámetros como el tiempo de retención máximo permitido y la frecuencia con la que se soluciona el modelo, entre otros; futuras investigaciones pueden abordar la parametrización de los modelos forma objetiva y sistemática. Por otra parte, también se puede analizar el impacto de los modelos en las variables mencionadas cuando el control se hace entre intervalos de tiempos que varíen y no solo cada minuto como se hizo en el presente trabajo

9. BIBLIOGRAFÍA

- Bellei, G., & Gkoumas, K. (2010). Transit vehicles' headway distribution and service irregularity. *Public Transport*, 2(4), 269-289. <https://doi.org/10.1007/s12469-010-0024-7>
- Berrebi, S. J., Hans, E., Chiabaut, N., Laval, J. A., Leclercq, L., & Watkins, K. E. (2017). Comparing bus holding methods with and without real-time predictions. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2017.07.012>
- Ceder, A. (2016). *Public Transit Planning and Operation: Modeling, Practice and Behavior, Second Edition*. CRC Press.
- Cervero, R. (2013). Bus rapid transit (BRT): An efficient and competitive mode of public transport. *IURD Working Paper 2013-01*. Recuperado a partir de <http://escholarship.org/uc/item/4sn2f5wc.pdf>
- Chen, Q., Adida, E., & Lin, J. (2013). Implementation of an iterative headway-based bus holding strategy with real-time information. *Public Transport*, 4(3), 165-186. <https://doi.org/10.1007/s12469-012-0057-1>
- Chen, W., Yang, C., Feng, F., & Chen, Z. (2012). An improved model for headway-based bus service unreliability prevention with vehicle load capacity constraint at bus stops. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2012. <https://doi.org/10.1155/2012/313518>
- Cipriani, E., Gori, S., & Petrelli, M. (2012). Transit network design: A procedure and an application to a large urban area. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 20(1), 3-14. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2010.09.003>
- Cortés, C. E., Jara-Díaz, S., & Tirachini, A. (2011). Integrating short turning and deadheading in the optimization of transit services. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 45(5), 419-434. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2011.02.002>

Daganzo, C. F. (2009). A headway-based approach to eliminate bus bunching: Systematic analysis and comparisons. *Transportation Research Part B: Methodological*, 43(10), 913-921.

<https://doi.org/10.1016/j.trb.2009.04.002>

Delgado, F., Muñoz, J. C., & Giesen, R. (2012). How much can holding and/or limiting boarding improve transit performance? *Transportation Research Part B: Methodological*, 46(9),

1202-1217. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2012.04.005>

Delgado, F., Muñoz, J. C., Giesen, R., & Cipriano, A. (2009). Real-time control of buses in a transit corridor based on vehicle holding and boarding limits. *Transportation Research Record*,

(2090), 59-67. <https://doi.org/10.3141/2090-07>

Desaulniers, G., & Hickman, M. D. (2007). Chapter 2 Public Transit. En C. B. and G. Laporte (Ed.), *Handbooks in Operations Research and Management Science* (Vol. 14, pp. 69-127).

Elsevier. Recuperado a partir de

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927050706140025>

Felipe Delgado, J. C. M. (2009). Real-Time Control of Buses in a Transit Corridor Based on Vehicle Holding and Boarding Limits. *Transportation Research Record*, 2090, 59-67.

<https://doi.org/10.3141/2090-07>

Giahi, R., & Tavakkoli-Mogahddam, R. (2014). A Holding Strategy to Optimize the Bus Transit Service. *International Journal of Industrial Engineering & Production Research*, 25(1), 33-

40.

González, D. L. (2003). *DISEÑO ÓPTIMO DE SISTEMAS DE TRANSPORTE PÚBLICO URBANO*

(Maestría en Ciencias de la Ingeniería). PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE.

Recuperado a partir de

https://www.academia.edu/9176445/DISE%C3%91O_%C3%93PTIMO_DE_SISTEMAS_DE_TRANSPORTE_P%C3%9ABLICO_URBANO

- He, S.-X. (2015). An anti-bunching strategy to improve bus schedule and headway reliability by making use of the available accurate information. *Computers and Industrial Engineering*, 85, 17-32. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2015.03.004>
- Hernández, D., Muñoz, J. C., Giesen, R., & Delgado, F. (2015). Analysis of real-time control strategies in a corridor with multiple bus services. *Transportation Research Part B: Methodological*, 78, 83-105. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2015.04.011>
- Huang, Z., Ren, G., & Liu, H. (2013). Optimizing Bus Frequencies under Uncertain Demand: Case Study of the Transit Network in a Developing City, Optimizing Bus Frequencies under Uncertain Demand: Case Study of the Transit Network in a Developing City. *Mathematical Problems in Engineering, Mathematical Problems in Engineering*, 2013, 2013, e375084. <https://doi.org/10.1155/2013/375084>, 10.1155/2013/375084
- Ji, Y., & Zhang, H. (2013). Dynamic holding strategy to prevent buses from bunching. *Transportation Research Record*, (2352), 94-103. <https://doi.org/10.3141/2352-11>
- Jiménez, M. L., & Soto, J. A. (2016). Utilización de tarjetas inteligentes para estimar matrices origen-destino. Aplicación al sistema Megabús, Pereira. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 26(2), 73-93. <https://doi.org/10.18359/rcin.1661>
- Leiva, C., Muñoz, J. C., Giesen, R., & Larrain, H. (2010). Design of limited-stop services for an urban bus corridor with capacity constraints. *Transportation Research Part B: Methodological*, 44(10), 1186-1201. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2010.01.003>
- Li, S., Ye, Z., & Wang, C. (2016). Optimization Model for Town–Village Bus Service Frequency Design. En *CICTP 2016* (pp. 864–875). Recuperado a partir de <http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/9780784479896.079>
- Liu, H., Skabardonis, A., & Zhang, W. (2003). A dynamic model for adaptive bus signal priority. En *Preprint CD-ROM, 82nd Transportation Research Board Annual Meeting, Washington, DC*.

Recuperado a partir de https://www.researchgate.net/profile/Wei-Bin_Zhang/publication/228567637_A_dynamic_model_for_adaptive_bus_signal_priority/links/0c96052df621a39244000000.pdf

Lizana, P., Muñoz, J. C., Giesen, R., & Delgado, F. (2014). Bus control strategy application: Case study of santiago transit system (Vol. 32, pp. 397-404). Presentado en *Procedia Computer Science*. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2014.05.440>

Lo, S.-C., & Chang, W.-J. (2012). Design of real-time fuzzy bus holding system for the mass rapid transit transfer system. *Expert Systems with Applications*, 39(2), 1718-1724. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.08.111>

Luhua, S., Yin, H., & Xinkai, J. (2011). Study on Method of Bus Service Frequency Optimal ModelBased on Genetic Algorithm. *Procedia Environmental Sciences*, 10, Part A, 869-874. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2011.09.139>

Mauttone, V., & Antonio, D. (2005). Optimización de recorridos y frecuencias en sistemas de transporte público urbano colectivo. Recuperado a partir de <https://www.colibri.udelar.edu.uy/handle/123456789/2937>

Milkovits, M. N. (2008). *Simulating service reliability of a high frequency bus route using automatically collected data* (Thesis). Massachusetts Institute of Technology. Recuperado a partir de <http://dspace.mit.edu/handle/1721.1/44197>

Muñoz, J. C., Cortés, C. E., Giesen, R., Sáez, D., Delgado, F., Valencia, F., & Cipriano, A. (2013). Comparison of dynamic control strategies for transit operations. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 28, 101-113. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2012.12.010>

Muñoz, J. C., Cortés Carrillo, C., Giesen, R., Hueichapan, S., Andrea, D., Delgado, F., ... Cipriano, A. (2013). Comparison of dynamic control strategies for transit operations. *Repositorio Académico - Universidad de Chile*. <https://doi.org/DOI: 10.1016/j.trc.2012.12.010>

- Ramírez, A., Soto, J. A., & Orozco, Á. (2015). Bus rapid transit control system using restrictive holding and operating tables. En *2015 CHILEAN Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies (CHILECON)* (pp. 141-148).
<https://doi.org/10.1109/Chilecon.2015.7400366>
- Rohani, M. M., Wijeyesekera, D. C., & Karim, A. T. A. (2013). Bus Operation, Quality Service and The Role of Bus Provider and Driver. *Procedia Engineering*, 53, 167-178.
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.02.022>
- Sánchez-Martínez, G. E., Koutsopoulos, H. N., & Wilson, N. H. M. (2016). Real-time holding control for high-frequency transit with dynamics. *Transportation Research Part B: Methodological*, 83, 1-19. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2015.11.013>
- Sánchez-Martínez, G. E., Wilson, N. H. M., & Koutsopoulos, H. N. (2017). Schedule-free high-frequency transit operations. *Public Transport*, 9(1-2), 285-305.
<https://doi.org/10.1007/s12469-016-0129-8>
- Shen, S., & Wilson, N. H. M. (2001). An Optimal Integrated Real-time Disruption Control Model for Rail Transit Systems. En P. D. S. Voß & P. D. J. R. Daduna (Eds.), *Computer-Aided Scheduling of Public Transport* (pp. 335-363). Springer Berlin Heidelberg.
https://doi.org/10.1007/978-3-642-56423-9_19
- Teng, J., & Jin, W. (2015). Development and evaluation of bus operation control system based on cooperative speed guidance. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2015.
<https://doi.org/10.1155/2015/928350>
- van Oort, N., & van Nes, R. (2010). Impact of Rail Terminal Design on Transit Service Reliability. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2146, 109-118. <https://doi.org/10.3141/2146-14>

- Vidales, M., & Daniel, A. (2005). Optimización de recorridos y frecuencias en sistemas de transporte público urbano colectivo. Recuperado a partir de <https://www.colibri.udelar.edu.uy/handle/123456789/2937>
- Wang, K., & Zhu, F. (2012). A real-time BRT signal priority approach through two-stage green extension. En *2012 9th IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC)* (pp. 7-11). <https://doi.org/10.1109/ICNSC.2012.6204882>
- Xuan, Y., Argote, J., & Daganzo, C. F. (2011). Dynamic bus holding strategies for schedule reliability: Optimal linear control and performance analysis. *Transportation Research Part B: Methodological*, 45(10), 1831-1845. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2011.07.009>
- Yu, B., Yang, Z., Sun, X., Yao, B., Zeng, Q., & Jeppesen, E. (2011). Parallel genetic algorithm in bus route headway optimization. *Applied Soft Computing Journal*, 11(8), 5081-5091. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2011.05.051>
- Zimmermann, L., Kraus, W., Koehler, L. A., & Camponogara, E. (2016). Holding Control of Bus Bunching without Explicit Service Headways. *IFAC-PapersOnLine*, 49(3), 209-214. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.07.035>
- Zolfaghari, S., Azizi, N., & Jaber, M. Y. (2004). A model for holding strategy in public transit systems with real-time information. *International Journal of Transport Management*, 2(2), 99-110. <https://doi.org/10.1016/j.ijtm.2005.02.001>